

مطالعه‌ی آزمایشگاهی قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتی در قوس ۹۰ درجه با آبشکن T شکل منفرد*

محمد واقفی^(۱)مسعود قدسیان^(۲)

چکیده در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتی بدون و با آبشکن T شکل مستقر در مقطع ۷۵ درجه پرداخته شده است. آزمایشات در یک کانال آزمایشگاهی با قوس ۹۰ درجه انجام گرفته است. در قوس توأم با آبشکن نیز دو حالت بستر صلب و بستر با چاله آبشستگی تعادل یافته با هم مقایسه شده است. در اندازه گیری میدان جریان از دستگاه سرعت سنج سه بعدی ADV استفاده شده است. برای این منظور، الگوی سه بعدی متوسط زمانی سرعت در قوس ۹۰ درجه با و بدون آبشکن برداشت گردیده است. مقایسه بین مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در مقاطع مختلف عرضی انجام شده و قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتی در طول قوس محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج، بیانگر این است که در قوس بدون آبشکن، قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتی در مقطع حدود ۴۰ درجه از بیشترین مقدار برخوردار است. در قوس توأم با آبشکن در دو حالت بستر صلب و بستر با چاله آبشستگی تعادل یافته، مقدار حداکثر قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی در مقطع حدود ۷۳٫۷۵ درجه می باشد. تغییرات به وجود آمده در جریان ثانویه، ورتیسیتی و گردابه‌های موجود در مقاطع عرضی از نکات مطرح شده در این مقاله است.

واژه های کلیدی قدرت جریان ثانویه، ورتیسیتی، آبشکن T شکل، قوس ۹۰ درجه.

Experimental Study on Power of Secondary Flow and Vortices in a 90 Degree Bend with Single T Shape Spur Dike

M. Vaghefi

M. Ghodsian

Abstract This paper deals with the results of experiments on strength of the secondary flow and vorticity in a channel bent with and without a spur dike located at section 75° of the bend. Experiments were conducted in a channel with a 90° bend. The results of experiments with spur dike for two cases of flat bed and scoured bed are compared. The three-dimensional Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) was used for measuring the flow field. The comparison of three dimensional components of velocity was made in different sections and strength of the secondary flow and vorticity along the bend were analyzed. The results show that in the bend without the spur dike, The strength of the secondary flow and vorticity were maximum at about section 40 degree of the bend. While in the bend with the spur dike, maximum strength of the secondary flow and vorticity were maximum at about section 73.75 degree of the bend. The variations of secondary flow, vorticity and vortices in different sections of the bend were also addressed in this paper.

Key Words Strength of Secondary Flow, Vortices, T Shape Spur Dike, 90 Degree Bend.

* تاریخ تصویب مقاله ۱۳۸۹/۳/۹ و تاریخ دریافت نسخه‌ی نهایی اصلاح شده ۱۳۸۹/۵/۹

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس

(۲) استاد، هیدرولیک، پژوهشکده‌ی مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

الگوی جریان استفاده می‌گردد، تحلیل جریان در اطراف آبشکن‌های استفاده شده در قوس خارجی، بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌گردد که علت آن اندرکنش بین الگوی جریان در قوس و الگوی جریان اطراف آبشکن و تأثیر جریان‌های حلزونی در قوس‌ها می‌باشد. در شناسایی هیدرودینامیک جریان‌های موجود در قوس، تعیین قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتهی مقاطع عرضی در طول قوس و در اطراف سازه‌های هیدرولیکی نظیر آبشکن، می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای داشته باشد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری سرعت سه بعدی، به تعیین قدرت جریان ثانویه پرداخته شده است. همچنین مقدار ورتیسیتهی موجود در مقاطع عرضی مختلف، اندازه‌گیری و مقدار متوسط ورتیسیتهی در مقاطع مختلف، محاسبه گردیده است. نتایج، بیانگر افزایش مقدار این دو پارامتر به صورت چشم‌گیر در اطراف آبشکن و خصوصاً در بالادست آن می‌باشد. ارتباط بین نحوه‌ی تغییرات این دو پارامتر در طول قوس با تغییرات توپوگرافی بستر از نکات ارائه شده در این مقاله است.

مروری بر تحقیقات گذشته

Shukry 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 [10]. Noh و Townsend در سال ۱۹۷۹ به بررسی تأثیر جریان ثانویه بر روی توزیع تنش برشی بستر و طول تأثیر آن از روی نحوه‌ی تغییرات تنش برشی پرداختند. نتیجه‌ی تحقیق، این بود که تأثیرات جریان ثانویه تولید شده بعد از خروجی از قوس نه تنها از بین نمی‌رود، بلکه تا فاصله‌ای در بازه مستقیم پایین دست ادامه می‌یابد. ایشان همچنین به بیان رابطه‌ای برای طول تأثیر جریان ثانویه‌ی تولید شده در قوس پرداختند [8]. Berge در سال ۱۹۹۰ تحقیقاتی در قوس ۹۰ درجه با هدف برداشت

رودخانه‌ها از دیرباز به عنوان یکی از اساسی‌ترین منابع تأمین آب، مورد توجه انسان بوده‌اند؛ به طوری که تمدن‌های بزرگ بشری برای بهره‌گیری از نعمت آب در حاشیه رودخانه‌ها شکل گرفته‌اند و از این رو نقشی حیاتی در زندگی بشر ایفا کرده‌اند. مسیر رودخانه‌ها در طبیعت توأم با قوس‌ها و پیچان‌رودها می‌باشد. معمولاً قسمت‌های خمیده یک رودخانه از جمله بازه‌های بحرانی در شناسایی رفتار هیدرولیکی رودخانه می‌باشد. طبیعت سه بعدی جریان و آشفتگی‌های موجود در قوس‌ها از یک طرف و تغییرات غیر یکنواخت توپوگرافی بستر و عمق جریان از طرف دیگر، باعث تشکیل جریان‌های پیچیده‌ای در قوس رودخانه‌ها می‌شود. در رودخانه‌ها به دلیل وجود تنش برشی در بستر و عدم وجود آن در سطح آزاد، سرعت جریان در نواحی بالایی نزدیک سطح آزاد زیاد می‌باشد که این پدیده منجر به عدم یکنواختی پروفیل سرعت در جهت قائم می‌شود. در قوس رودخانه‌ها و در اثر نیروی گریز از مرکز و اندرکنش آن با گرادین‌های جانبی فشار ناشی از شیب جانبی سطح آب، جریانی تشکیل می‌شود که به جریان ثانویه موسوم است. در این جریان، آب در سطح آب به طرف قوس خارجی رانده می‌شود و در نزدیکی بستر به سمت قوس داخلی حرکت می‌کند. در اثر اندرکنش بین جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی پروفیل سرعت در عمق، الگوی جریانی به نام جریان حلزونی تشکیل می‌شود که این الگوی جریان، باعث ایجاد آشفتگی شدید جریان می‌گردد. این جریان، تأثیر زیادی بر مورفولوژی قوس رودخانه دارد؛ به طوری که سرعت بالای جریان در قوس بیرونی 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 جداره‌ی رودخانه در خم‌ها و یا برای اهدافی دیگر نظیر حفظ

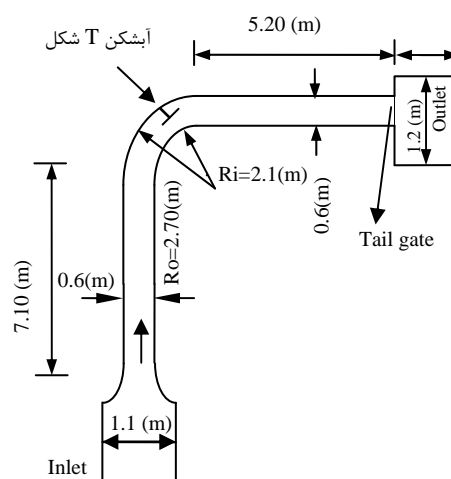
جلوگیری از فرسایش قوس بیرونی عنوان کردند [2]. Yang در سال ۲۰۰۵ به بررسی اندرکنش تنش برشی مرزی و توزیع سرعت و جریان‌های ثانویه در کانال‌های باز پرداخت و توزیع سرعت و تنش برشی را در حالت جریان یکنواخت و ماندگار و همچنین متلاطم به کار برد و با در نظر گرفتن اثر سرعت عمود بر دیواره‌ی کانال به تبیین معادلات حاکم برای توزیع تنش برشی رینولدزی و تنش برشی پرداخت. معادلات به دست آمده از تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی که در گذشته به دست آمده است، برخوردار بود [12]. Marion و Zaramella در سال ۲۰۰۶ به بررسی عددی اثر گرادیان سرعت و جریان ثانویه در انتشار آلودگی در رودخانه‌های پیچانروبی پرداختند [7]. Dey و Barbhuiya در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ به مطالعه‌ی آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی، تعیین تنش‌های رینولدزی، میزان آشفستگی، میدان جریان آشفته و بررسی مقدار ورتیسیتی در اطراف کوله پل با مقطع نیم دایره، مستطیلی و ذوزنقه‌ای در مسیر مستقیم پرداختند [3,4 and 5]. Tang و همکاران در سال ۲۰۰۶ به بررسی قدرت جریان ثانویه در اطراف آبشکن‌های ساده مستقر در مسیر مستقیم با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پرداختند [11]. در مورد آبشکن‌های T شکل مستقر در قوس نیز در تحقیقات گسترده‌ای توسط Ghodsian و همکاران در سال ۲۰۰۸ [13]، Vaghefi و همکاران در سال ۲۰۰۹ [14] و همچنین ۱۳۸۷ [15,16,17] در مورد الگوی آبشستگی و الگوی جریان اطراف آبشکن T شکل منفرد مستقر در قوس ۹۰ درجه پرداخته شده است؛ اما این مقاله به محاسبه‌ی قدرت جریان ثانویه در اطراف آبشکن‌های موجود در قوس رودخانه‌ها و محاسبه‌ی مقدار ورتیسیتی و تغییرات آن در طول قوس ۹۰ درجه پرداخته است. محاسبه‌ی پارامترهای مذکور در قوس توأم با آبشکن و با توجه به هندسه آبشکن T شکل از نوآوری‌های موجود در این مقاله می‌باشد.

داده‌های آزمایشگاهی از الگوی سرعت و تغییرات توپوگرافی بستر برای مقایسه این نتایج با خروجی مدل ریاضی صورت گرفت که نتایج آن با نتایج Odgaard (1984) همخوانی کامل داشت [1]. Lian و همکاران در سال ۱۹۹۹ با استفاده از مدل ۲ بعدی متوسط‌گیری شده در عمق، الگوی جریان در دو قوس ۹۰ و ۱۸۰ درجه را مورد بررسی قرار دادند و هدف خود را تهیه‌ی یک مدل دو بعدی که تأثیر جریان ثانویه را در نظر می‌گیرد، عنوان کردند. تأثیر جریان ثانویه در این مدل از طریق محاسبه تانسور تنش در نظر گرفته شده است. تانسور تنش، عاملی است که تأثیر جریان ثانویه را به دلیل وجود اختلاف بین مقدار متوسط‌گیری شده و توزیع واقعی سرعت در میدان جریان قوس در حالت استفاده از معادلات متوسط‌گیری شده در عمق وارد مسائل می‌کند. مهمترین نتیجه‌ی گرفته شده، این بود که نیروی غالب در قوس تند نیروی حاصل از تنش انتشاری می‌باشد و نیروی گریز از مرکز و اصطکاک بستر از اهمیت نسبی کمتری برخوردار است؛ درحالی‌که برای قوس ملایم، نیروی غالب، نیروی گریز از مرکز می‌باشد. همچنین جریان ثانویه در قوس ۱۸۰ درجه، قوی‌تر از قوس ۹۰ درجه است [6]. Graf و Blanckart در سال ۲۰۰۱ به بررسی الگوی جریان و آشفستگی در کانال انحنادار پرداختند. مجرای مورد نظر، خم ۱۲۰ درجه بود که هدف اصلی آن‌ها بررسی جریان در نیمه بیرونی مقطع عرضی ۶۰ درجه بود. آن‌ها مشاهده کردند که حداکثر سرعت در نزدیکی بستر مشاهده می‌شود و یک جریان چرخشی مرکزی وجود دارد. علاوه بر این، یک جریان چرخشی دیگر در خلاف جهت این جریان در نزدیکی قوس بیرونی وجود دارد و حداکثر سرعت در مرز این دو سلول چرخشی است و مقدار آن بزرگتر از سرعت طولی جریان یکنواخت در کانال مستقیم است. برخی از محققین، وجود این جریان ثانویه دوم را که در شرایط خاص هندسی کانال به وجود می‌آید، عاملی برای

روش تحقیق

میلی‌متر و انحراف معیار $1/3$ میلی‌متر تا عمق 35 سانتیمتری پوشیده شد. دبی جریان به وسیله‌ی یک روزنه‌ی کالیبره شده تنظیم گردید و برای کنترل جریان از یک دریچه‌ی قطاعی که در انتهای کانال نصب گردیده بود، استفاده شد. آبشکن به صورت صفحات مستطیلی با پلان T شکل و از جنس پلکسی گلاس بود. ضخامت آبشکن، 1 سانتیمتر و ارتفاع آن 65 سانتیمتر در نظر گرفته شد. انجام آزمایش در قوس تنها و در فاصله زمان تعادل، بیانگر وجود بیشترین میزان آبشستگی در قوس تنها در زاویه 75 درجه بود و به همین دلیل آبشکن در زاویه 75 درجه که بیشترین میزان آبشستگی در قوس را داشت مستقر گردید [18]. دبی جریان در کلیه‌ی آزمایشات ثابت و برابر 25 لیتر بر ثانیه و در تمام آزمایشات، شرایط آب تمیز حاکم بود. آزمایشات در سه بخش: الگوی جریان پیرامون قوس تنها، قوس با آبشکن در موقعیت استقرار 75 درجه با بستر صلب و قوس با آبشکن در موقعیت استقرار 75 درجه با بستر تعادل یافته انجام گرفت. در آزمایش با بستر صلب الگوی کف کانال توأم با آبشکن شابلون برداری شد و سراسر قوس به وسیله‌ی یک صفحه‌ی فلزی که بر روی رسوبات کف کانال نصب گردیده بود، پوشیده شد. به منظور تأمین زبری بستر بر روی صفحه فلزی، چسب مخصوص زده شد و مصالح بستر بر روی صفحه پاشیده شد. با این عمل در طول آزمایش آبشستگی بستر مشاهده نمی‌شود. در آزمایش با بستر تعادل یافته، ابتدا در مدت زمان تعادل که 24 ساعت بود، آبشستگی اطراف آبشکن و تغییرات توپوگرافی قوس به تعادل رسید و سپس در مدت زمان 12 ساعت بستر خشک شد. پس از خشک شدن بستر، چسب مخصوصی بر روی بستر تعادل یافته پاشیده شد و بعد از گذشت زمان 12 ساعت، بستر خشک گردید. برداشت پروفیل سرعت سه بعدی در 23 مقطع عرضی در طول قوس و 10 پلان افقی انجام گرفت که 5 پلان آن داخل چاله آبشستگی بود. همچنین در هر محور عرضی 18

آزمایشات مورد نظر در کانالی با قوس 90 درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام گرفت. شکل (۱) پلان و هندسه‌ی قوس مورد نظر را نشان می‌دهد. این کانال از یک قسمت مستقیم به طور $7/1$ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول $5/2$ متر در پایین دست تشکیل شده که این دو قسمت توسط قوس 90 درجه به شعاع انحنای خارجی $2/7$ متر به هم متصل گردیده. این قوس بر طبق نظر Rodi و هم‌کاران در رده قوس‌های ملایم قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که بر طبق نظر Rodi قوس‌های با نسبت شعاع انحنا به عرض کانال کوچکتر از 3 ، جزء قوس‌های تند و قوس‌های با نسبت شعاع انحنا به عرض کانال بزرگتر از 3 جزء قوس‌های ملایم محسوب می‌گردد [6]. کانال از جنس شیشه ساخته شده که توسط قاب‌های فولادی پایداری آن حفظ می‌گردید. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر 4 ، ارتفاع آن 70 سانتی‌متر و عرض آن 60 سانتی‌متر بود. شیب کانال حدود $0/001$ و عدد فرود جریان در حدود $0/35$ و عدد رینولدز، حدود 65000 در ابتدای قوس 90 درجه بود.



شکل ۱ پلان کانال آزمایشگاهی مورد نظر

کف کانال از رسوباتی با قطر متوسط معادل $1,28$

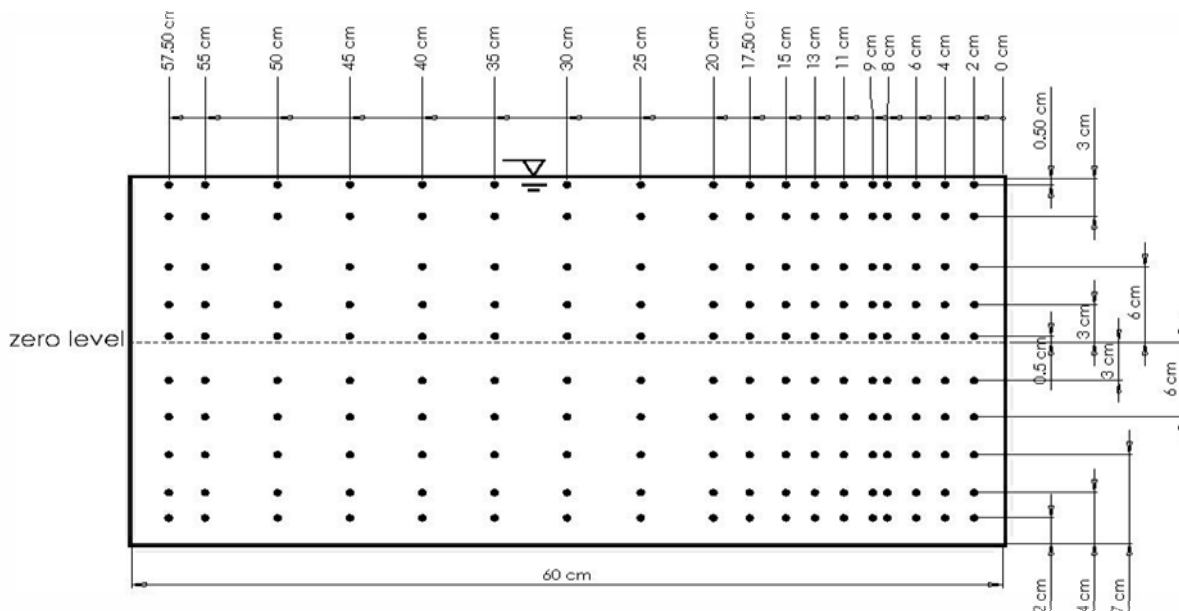
در اطراف بال و جان آبشکن، نمونه گیر سرعت در جهت‌های مختلف قرار داده شد. همچنین سرعت‌های برداشت شده در طول قوس ۹۰ درجه از مختصات قطبی به مختصات دکارتی تبدیل گردید. برداشت پروفیل سرعت سه بعدی در آزمایش قوس بدون آبشکن در ۱۱ مقطع عرضی در طول قوس و در ۵ تراز انجام گرفت و در هر محور عرضی ۱۳ نقطه قرائت شد. مشاهدات کیفی الگوی جریان نیز در آزمایشات انجام گردید.

در بررسی جریان ثانویه در مسیرهای قوسی، دو معیار اصلی وجود دارد که در این مقاله به بررسی این دو معیار برای قوس بدون آبشکن و با آبشکن پرداخته می‌شود. Shukry در سال ۱۹۵۰ با انجام مطالعاتی بر روی جریان در قوس رودخانه، ضمن تشریح مکانیسم جریان ثانویه، جهت بحث کمی بر روی این پدیده، معیار زیر را برای قدرت جریان ثانویه معرفی کرده است [6]:

$$S_{xy} = \frac{K_{lateral}}{K_{main}} \quad (1)$$

نقطه قرائت شد. شبکه بندی ذکر شده غیر یکنواخت بود و در نزدیکی آبشکن ریزتر می‌باشد. در شکل (۲) نمایش شماتیکی از شبکه برداشت داده‌ها در مقطع عرضی نشان داده شده است.

برای اندازه گیری سرعت از سرعت سنج سه بعدی ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) استفاده شد. از مشخصات این دستگاه، اندازه‌گیری جریان در فاصله‌ی ۵ سانتیمتری نوک حسگر آن می‌باشد. به همین دلیل برای اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی سطح جریان از حسگر جانب نگر (sidelooking) و در لایه‌های دیگر از حسگر پایین نگر (downlooking) استفاده شد. دستگاه سرعت سنج، روی فرکانس ۵۰ هرتز تنظیم گردید و مدت زمان اندازه‌گیری هر نقطه از شبکه‌بندی تعریف شده یک دقیقه بود. در هر نقطه و در هر جهت ۳۰۰۰ داده سرعت خروجی این دستگاه بود که این داده‌ها توسط نرم افزارهای جانبی vecterino و explore v متوسط‌گیری و در نقاط نزدیک آبشکن و به منظور قرائت سرعت جریان



شکل ۲ نمایش شماتیکی از شبکه برداشت داده‌ها در هر مقطع عرضی

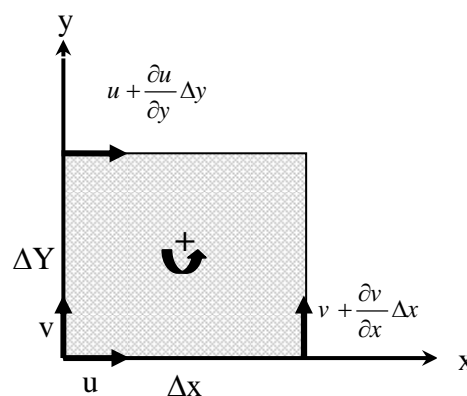
نتایج و بحث

در این تحقیق برای مقاطع عرضی مختلف در طول قوس ۹۰ درجه با هر دو روش ذکر شده، قدرت جریان ثانویه و میزان متوسط ورتیسیتی شبکه در قوس بدون آبشکن و با آبشکن محاسبه گردیده است. در شکل (۴) قدرت جریان ثانویه، مقدار ورتیسیتی متوسط و مقدار ورتیسیتی متوسط بدون بعد شده با حداکثر متوسط ورتیسیتی یک مقطع در طول قوس ۹۰ درجه نشان داده شده است. این شکل، بیانگر تغییرات پارامترهای ذکر شده در طول قوس بدون آبشکن، با آبشکن در شرایط بستر تعادل یافته و با آبشکن در شرایط بستر صلب می‌باشد. در شکل (۴-الف) و (۴-ب) قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی از ابتدای قوس تا شروع چاله برای هر دو حالت (قوس با آبشکن در شرایط بستر تعادل یافته و با آبشکن در شرایط بستر صلب) تقریباً ثابت می‌باشد. از شروع چاله آبشستگی واقع در موقعیت حدود ۶۰ درجه همان‌طور که در شکل‌های (۴-الف و ۴-ب) مشاهده می‌شود، تا محل آبشستگی حداکثر واقع در مقطع ۷۴ درجه و در نزدیکی لبه بال آبشکن، این دو پارامتر صعودی می‌باشند. در این مقطع قدرت جریان ثانویه در حالت بستر تعادل یافته در حدود ۲ برابر حالت بستر متحرک است؛ درحالی‌که ورتیسیتی بستر صلب در حدود ۳/۵ برابر حالت بستر متحرک است. از مقطع ۷۴ درجه و تا مقطع انتهایی بال پایین دست آبشکن در مقطع ۷۶/۲۵ درجه روند دو پارامتر مورد بررسی نزولی است از مقطع ۷۶/۲۵ درجه تا مقطع ۸۲/۵ درجه، در قوس با آبشکن و در حالت بستر تعادل یافته، این دو پارامتر صعودی و سپس تا انتهایی قوس نزولی می‌باشد؛ درحالی‌که در قوس با آبشکن و در حالت بستر صلب از مقطع ۷۶/۲۵ تا حدود ۸۲/۵ این دو پارامتر نزولی و سپس تا انتهایی قوس صعودی است. در قوس بدون آبشکن نیز این دو پارامتر تا زاویه حدود ۴۰

این معیار در یک مقطع عرضی معین عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی. در معادله فوق، S_{xy} بیانگر قدرت جریان ثانویه، K_{main} و $K_{lateral}$ به ترتیب نشان دهنده‌ی انرژی جنبشی جریان جانبی و انرژی جنبشی جریان اصلی می‌باشند. قدرت جریان ثانویه بیانگر تمایل جریان برای حرکت به سمت ساحل خارجی در مسیرهای قوسی می‌باشد. معیار مهم و تئوریک دیگری که برای تعیین تأثیر جریان ثانویه در طول مسیرهای قوسی بدان اشاره شده است، معیار ورتیسیتی (Vorticity) می‌باشد. طبق تعریف و با توجه به شکل (۳) نرخ خالص چرخش پادساعتگرد یک سلول به ابعاد $\Delta X \times \Delta Y$ حول محور عمود بر صفحه (متوسط مجموع چرخش وجوه ΔX و ΔY)، چرخش (Rotation) نامیده شده و به صورت معادله‌ی (۲) بیان می‌شود:

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2)$$

در این معادله ω_z میزان چرخش حول محور Z ، u سرعت در جهت عرضی و v سرعت در جهت عمقی می‌باشد.



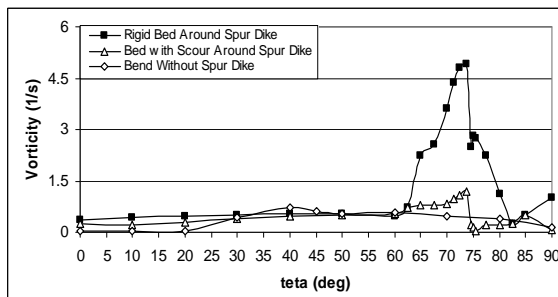
شکل ۳ دیاگرام چرخش یک سلول حول محور عمود بر صفحه

از محدوده‌ی عملکرد بیشتری نسبت به قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب (شکل ۵-ب) برخوردار است. از مقطع حدود ۳۰ درجه تا مقطع حدود ۶۰ درجه با توجه به شکل (۴-الف) و (۴-ب) قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتی در قوس بدون آبشکن و قوس توأم با آبشکن (بستر صلب و تعادل یافته) به هم نزدیک بوده که دلیل آن روند تغییرات تقریباً یکسان خطوط جریان می‌باشد. همچنین شکل (۴-ج) بیانگر روند صعودی و سپس نزولی مقدار ورتیسیتی در قوس بدون آبشکن و در محدوده‌ی ۳۰ تا ۶۰ درجه می‌باشد و همانطور که مشهود است، در بین مقطع ۴۰ و ۴۵ درجه که محل برخورد خطوط جریان ورودی از مسیر مستقیم بالادست به ساحل خارجی می‌باشد، بیشترین مقدار ورتیسیتی وجود دارد و سپس روند نمودار، نزولی است. در بین مقاطع ۳۰ تا ۶۰ درجه، مقدار ورتیسیتی در حالت قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته صعودی بوده که این پدیده به دلیل شروع حفره آبستگي از موقعیت حدود ۶۵ درجه و به فاصله‌ی ۵ برابر طول آبشکن در مسیر بالا دست می‌باشد؛ درحالی‌که در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب مقدار ورتیسیتی در این فاصله تقریباً ثابت است. شکل (۶) پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۶۰ درجه را نشان می‌دهد.

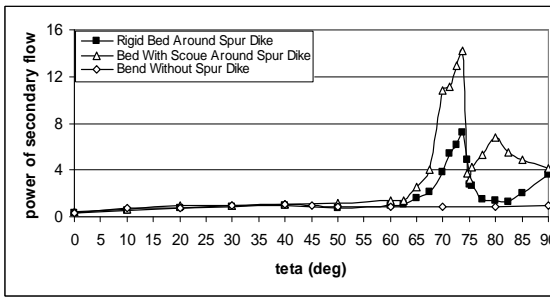
شکل (۶-الف) جریان ثانویه را در قوس بدون آبشکن نشان می‌دهد و شکل‌های (۶-ب) و (۶-ج) بیانگر وقوع سه سلول چرخشی در قوس توأم با آبشکن (بستر صلب و تعادل یافته) می‌باشد که سلول چرخشی سوم در نزدیکی ساحل خارجی و در جهت عقربه‌های ساعت می‌باشد. از مقطع ۶۰ تا ۷۰ درجه (شکل ۴-الف) قدرت جریان ثانویه در قوس بدون آبشکن از تغییرات اندکی برخوردار است.

درجه با مقادیر عددی کمتر نسبت به قوس با آبشکن در دو حالت بستر تعادل یافته و بستر صلب، صعودی و سپس تا انتهای قوس نزولی می‌باشد. در شکل (۴-ج) نیز روند ذکر شده در سه آزمایش و در مورد پارامتر ورتیسیتی در حالت بدون بعد شده با حداکثر ورتیسیتی یک مقطع در طول قوس نشان داده شده است. در بررسی تغییرات پارامترهای ذکر شده در طول قوس همان‌طور که مشاهده می‌شود (شکل ۳-الف) تا مقطع حدود ۳۰ درجه قدرت جریان ثانویه در هر سه حالت تقریباً با هم برابر است. شکل (۴-ب) نیز بیانگر افزایش جزئی میزان ورتیسیتی در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب در مقایسه با دو حالت دیگر تا مقطع حدود ۳۰ درجه می‌باشد. در این فاصله و در قوس بدون آبشکن (شکل ۴-ج) ورتیسیتی از مقدار بیشتری نسبت به مقاطع ابتدای قوس برخوردار است. در ابتدای قوس تا زاویه حدود ۲۰ درجه جریان تحت تأثیر جریان ورودی از مسیر پایین دست، دارای چرخش زیادی نیست و در فاصله ۲۰ تا ۴۰ درجه با توجه به برخورد جریان به ساحل خارجی میزان ورتیسیتی شبکه به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

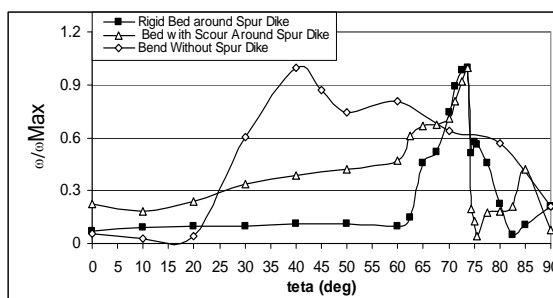
شکل (۵) بیانگر پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۳۰ درجه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود (شکل ۵-الف) در قوس بدون آبشکن الگوی جریان ثانویه شکل گرفته از ابتدای قوس با حرکتی به سمت ساحل خارجی در سطح آب و به سمت ساحل داخلی در نزدیک بستر ادامه می‌یابد ولی در قوس توأم با آبشکن (شکل‌های ۵-ب و ۵-ج) جریان ثانویه اصلی به دو سلول چرخشی مجزا با جهتی خلاف جهت عقربه‌های ساعت تبدیل شده است. همچنین، جریان ثانویه دوم در خلاف جهت جریان اصلی، در نزدیکی ساحل خارجی و در لایه‌های نزدیک سطح آب شکل می‌گیرد. این جریان در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته، (شکل ۵-ج)



(ب)

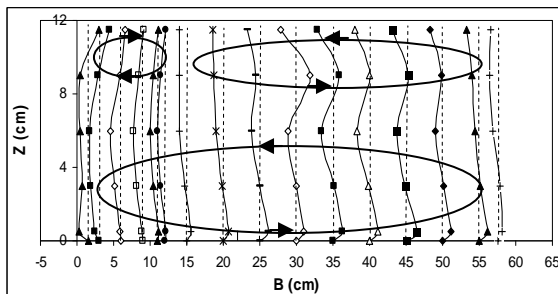


(الف)

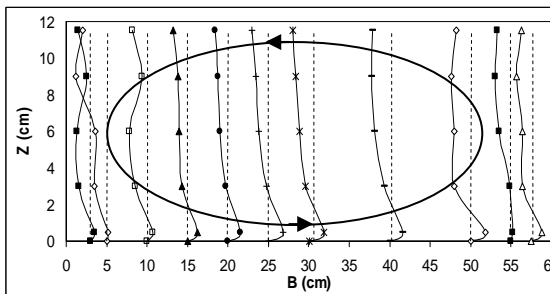


(ج)

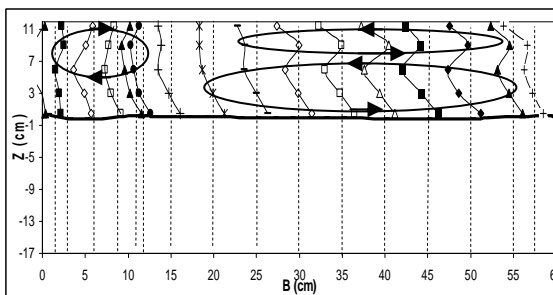
شکل ۴ تغییرات پارامترهای (الف) قدرت جریان ثانویه (ب) مقدار ورتیسیتهی متوسط و (ج) مقدار ورتیسیتهی متوسط بدون بعد در طول قوس ۹۰ درجه



(ب)

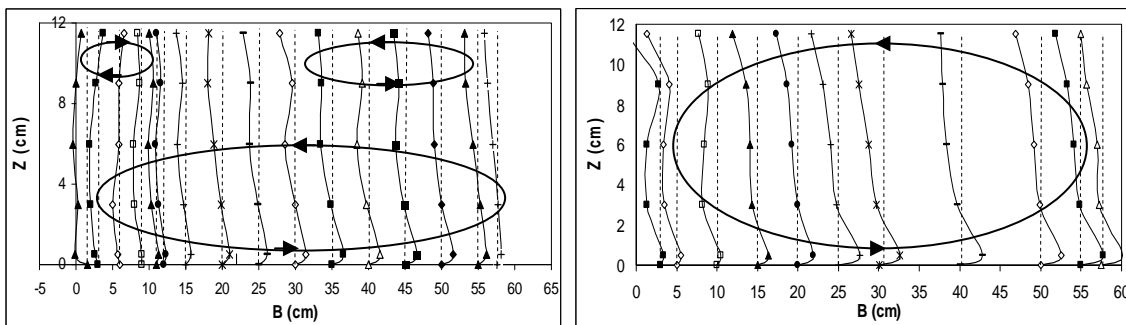


(الف)



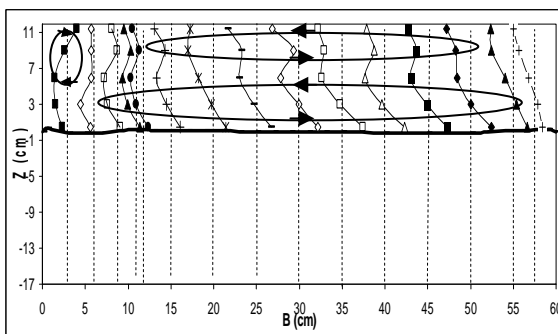
(ج)

شکل ۵ پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۳۰ درجه (الف) قوس تنها (ب) قوس با آبشکن و بستر صلب (ج) قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته



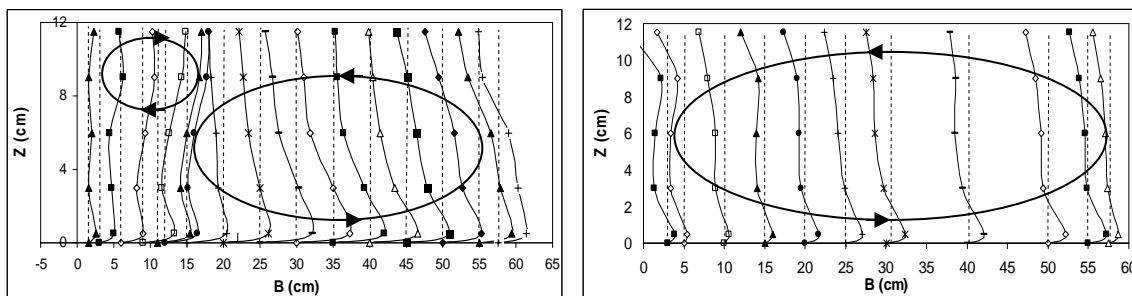
(ب)

(الف)



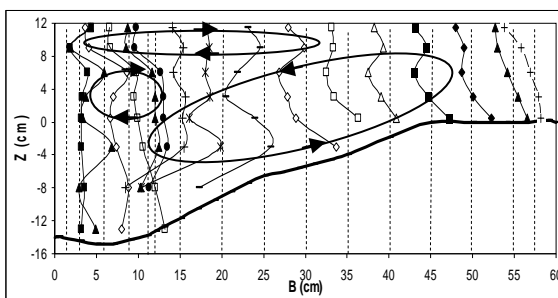
(ج)

شکل ۶ پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۶۰ درجه (الف) قوس تنها (ب) قوس با آبشکن و بستر صلب (ج) قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۷ پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۰ درجه (الف) قوس تنها (ب) قوس با آبشکن و بستر صلب (ج) قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته

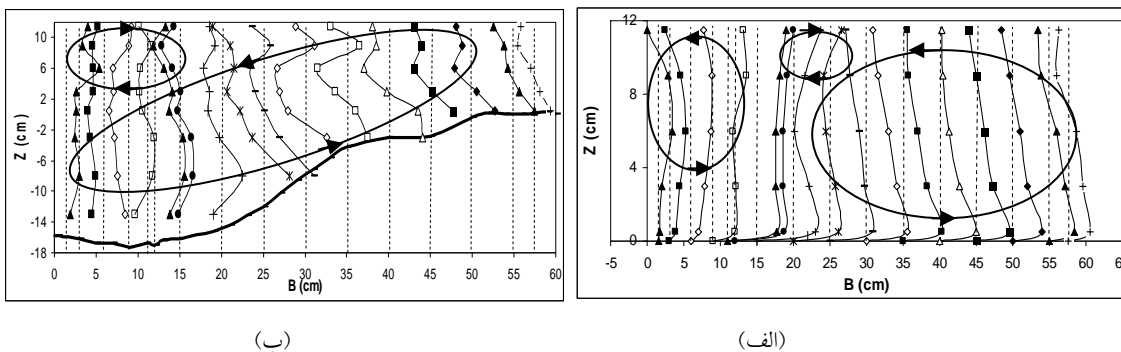
افزایش سرعت عرضی با جهتی به سمت ساحل داخلی در نزدیکی بستر و جهتی به سمت ساحل خارجی در نزدیکی سطح آب در مقایسه با مقطع ۶۰ درجه در شکل‌های (۶-ب) و (۶-ج) دلیلی بر روند صعودی عنوان شده در قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتی در این محدوده می باشد. در مقطع ۷۰ تا ۹۰ درجه با توجه به شکل (۴-الف)، قدرت جریان ثانویه در قوس توأم با آبشکن با بستر تعادل یافته ابتدا تا مقطع ۷۴ درجه و به فاصله ۰/۵ برابر طول آبشکن در بالا دست افزایش می‌یابد. این مقطع در جلو بال آبشکن می باشد و محل آبشستگی حداکثر نیز تقریباً در همین مقطع قرار دارد. سپس قدرت جریان ثانویه در مقاطع بین بال بالا دست و ساحل خارجی کاهش می‌یابد که دلیل آن، تنگ شدگی مقطع در این محدوده می باشد. این افت در قدرت جریان ثانویه در پایین دست آبشکن و مقاطع بین بال پایین دست و ساحل خارجی نیز مشاهده می شود. با بازشدگی دوباره‌ی مقطع قدرت جریان ثانویه تا مقطع حدود ۸۰ درجه، معادل ۲/۵ برابر طول آبشکن به طرف پایین دست و با توجه به حفره آبشستگی ایجاد شده در نزدیکی ساحل خارجی افزایش می‌یابد و تحت تأثیر مسیر مستقیم پایین دست و انتهای قوس نزولی می باشد. این روند در مورد قوس توأم با آبشکن با بستر صلب با نسبت کمتر تا مقطع انتهای بال پایین دست مشاهده می شود و از این مقطع تا انتهای قوس با توجه به بازشدگی بعد از آبشکن و مسیر خطوط جریان به سمت ساحل خارجی صعودی می باشد. در قوس بدون آبشکن نیز تغییرات نزولی محدوده قبلی با نسبت به مراتب کمتر در مقایسه با قوس توأم با آبشکن مشاهده می گردد. روند ذکر شده در مورد تغییرات ورتیسیتی نیز در شکل (۴-ب) و (۴-ج) در مقطع ۷۰ تا ۹۰ درجه مشاهده می شود. در این محدوده بنا به دلایل ذکر شده‌ی قبلی، مقدار ورتیسیتی در قوس توأم با آبشکن با مقطع صلب بیشتر از قوس توأم با آبشکن با بستر تعادل یافته می باشد. در قوس بدون آبشکن نیز مقدار ورتیسیتی از روند نزولی و با مقادیر کمتر نسبت به حالت استقرار آبشکن برخوردار است.

در قوس توأم با آبشکن، تأثیر وجود این سازه در مسیر جریان، در مقدار کمی قدرت جریان ثانویه به خوبی مشهود می باشد. همانطور که مشاهده می شود، وجود حفره آبشستگی موضعی و تمایل جریان برای گسترش حفره آبشستگی در اطراف آبشکن دلیلی بر افزایش قدرت جریان ثانویه در حالت بستر تعادل یافته نسبت به بستر صلب می باشد. همچنین مقدار ورتیسیتی نیز (شکل ۴-ب) در این فاصله و در مورد قوس توأم با آبشکن از روند صعودی برخوردار است. البته مقدار ورتیسیتی در قوس توأم با آبشکن و بستر صلب از مقدار چرخش بیشتری نسبت به قوس توأم با آبشکن و بستر تعادل یافته برخوردار است که دلیل آن، آشفته‌گی شدید جریان و الگوی پیچیده آن در ابتدای آزمایشات و در شروع گسترش حفره‌ی آبشستگی نسبت به الگوی جریان در حالت استقرار آبشکن با چاله آبشستگی تعادل یافته می باشد.

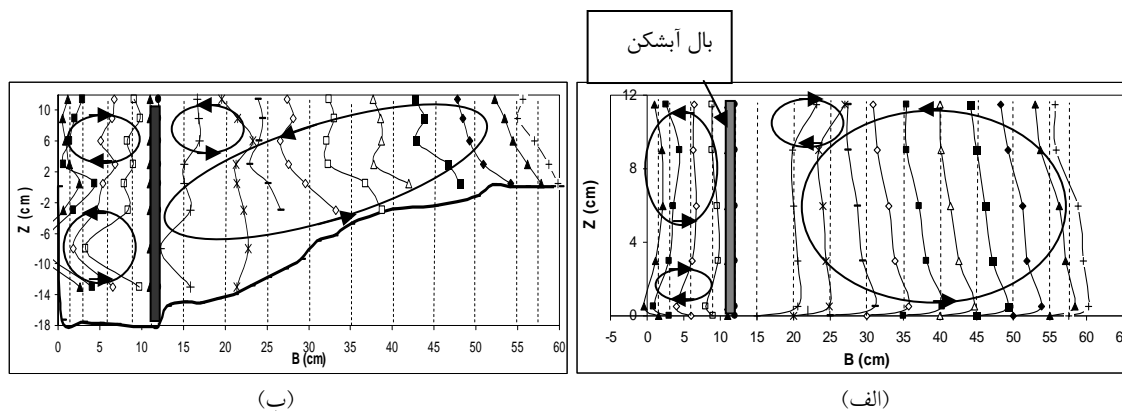
مقدار بدون بعد ورتیسیتی در این فاصله نیز (شکل ۴-ج) نشان دهنده‌ی افزایش مقدار چرخش در قوس توأم با آبشکن به دلیل استقرار آبشکن در مسیر جریان و کاهش مقدار چرخش در قوس بدون آبشکن به دلیل یکنواخت تر شدن انحنای خطوط جریان در نیمه دوم قوس می باشد. شکل (۷) بیانگر پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۰ درجه می باشد. وقوع جریان ثانویه در قوس بدون آبشکن در شکل (۷-الف) مشاهده می شود. همچنین شکل (۷-ب) وجود دو سلول چرخشی در خلاف جهت یکدیگر در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب را نشان می دهد. سلول چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت و نزدیک ساحل خارجی، بیانگر تأثیر آبشکن بر جریان و تغییر در مسیر جریان عرضی در قسمتی از مقطع عرضی کانال می باشد. شکل (۷-ج) نیز الگوی جریان عرضی در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته را نشان می دهد. در این مقطع همچنین وقوع دو سلول چرخشی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و در خلاف جهت جریان ثانویه‌ی اصلی، بیانگر تأثیر آبشکن و چاله‌ی ایجاد شده می باشد.

عرضی به سمت قوس داخلی در نزدیکی بستر و به سمت قوس خارجی در نزدیکی سطح جریان در قوس توأم با آبشکن و بستر تعادل یافته در مقایسه با قوس توأم با آبشکن و بستر صلب می‌باشد. شکل (۹) پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۴/۵ درجه، نزدیک جان آبشکن و در فاصله‌ی معادل ۰/۲۵ طول آبشکن در بالادست را نشان می‌دهد. وجود چهار سلول چرخشی در این مقطع در قوس با آبشکن با بستر صلب در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود. وجود دو سلول چرخشی با جهت‌های مخالف در محدوده‌ی بین بال و ساحل خارجی و اثر متقابل آن‌ها بر روی هم در کاهش مقادیر قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی مؤثر می‌باشد. این روند در مورد آبشکن با بستر تعادل یافته نیز در شکل (۹-ب) دیده می‌شود. تغییر جهت گردابه‌ها در محدوده‌ی بین بال و ساحل خارجی در شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) در این مقطع نشانگر تأثیر چاله آبشستگی بر جریان می‌باشد.

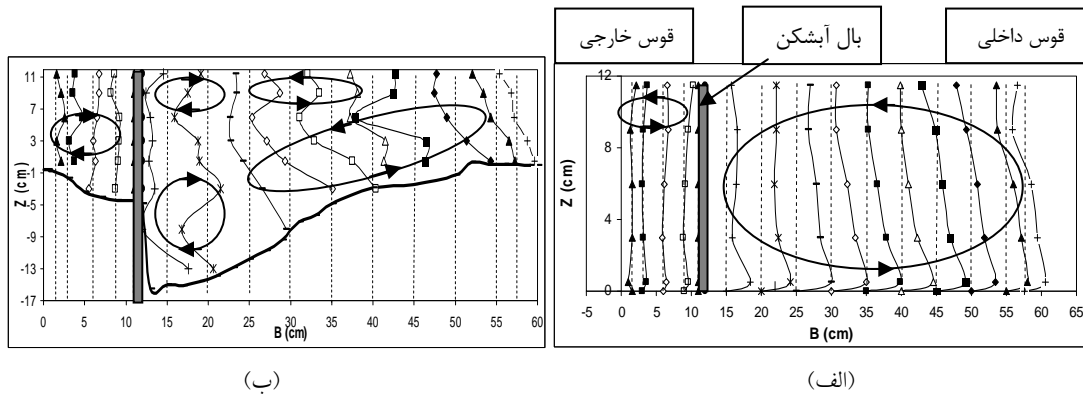
شکل (۸) پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۳/۷۵ درجه، در جلو بال آبشکن و در فاصله‌ی معادل ۰/۶ طول آبشکن در بالادست را نشان می‌دهد. وجود دو سلول چرخشی مجزا در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب (شکل ۸-الف) با جهت خلاف عقربه‌های ساعت و یک سلول چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت در جلو بال آبشکن و در محدوده‌ی شروع ناحیه‌ی جدانشدگی جریان مشاهده می‌گردد. در همین مقطع و در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته (شکل ۸-ب) دو سلول چرخشی مشاهده می‌شود که یکی جریان ثانویه‌ی اصلی است که در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و در جهت شیب چاله آبشستگی بوده و دیگری جریان ثانویه دوم ناشی از گردابه‌های به وجود آمده در بالا دست آبشکن و در جهت عقربه‌های ساعت می‌باشد. مقایسه‌ی کیفی بین جهت و کمی بین مقادیر سرعت در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) بیانگر افزایش سرعت



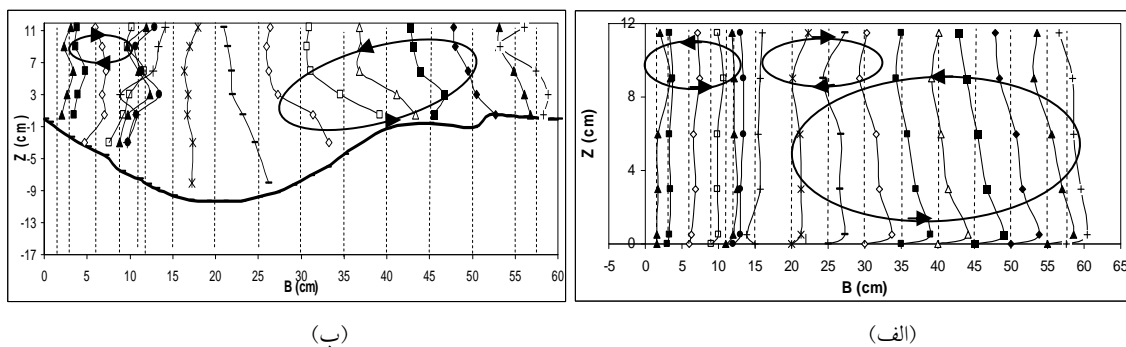
شکل ۸ پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۳/۷۵ درجه (الف) قوس با آبشکن و بستر صلب (ب) قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته



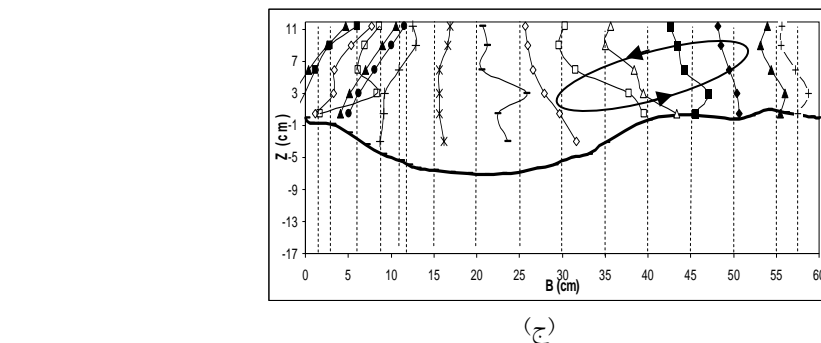
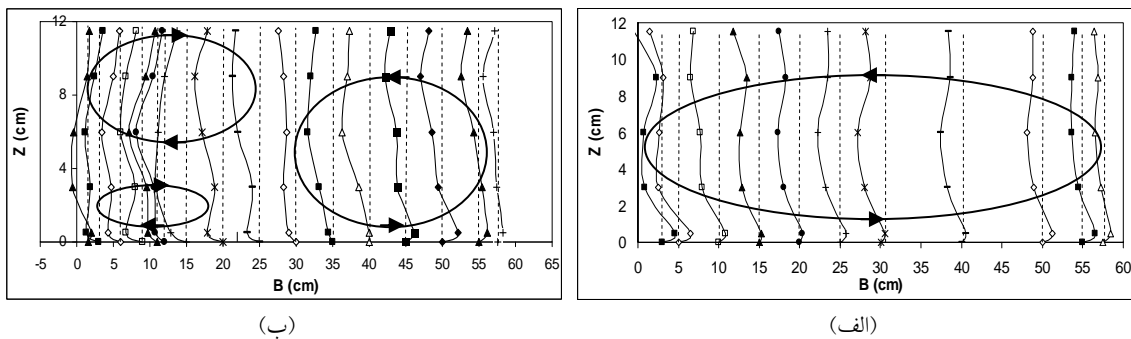
شکل ۹ پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۴/۵ درجه (الف) قوس با آبشکن و بستر صلب (ب) قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته



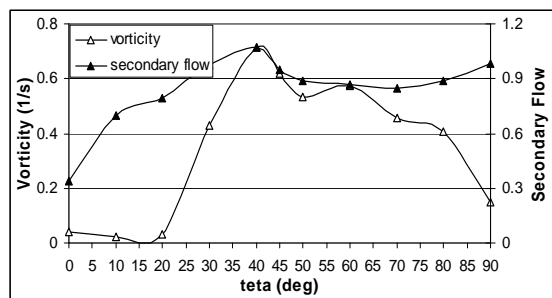
شکل ۱۰ پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۵/۵ درجه (الف) قوس با آبشکن و بستر صلب (ب) قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته



شکل ۱۱ پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۷/۵ درجه (الف) قوس با آبشکن و بستر صلب (ب) قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته



شکل ۱۲ پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۹۰ درجه (الف) قوس تنها (ب) قوس با آبشکن و بستر صلب (ج) قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته



شکل ۱۳ تغییرات جریان ثانویه و ورتیسیتی در طول قوس بدون آبشکن

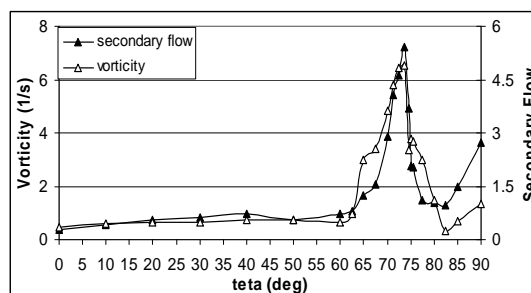
جهت جریان اصلی در این مقطع تشکیل می‌گردد. مقایسه‌ی بین مقادیر سرعت عرضی در دو مقطع ۷۵/۵ و ۷۷/۵ درجه در شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۱-الف)، بیانگر کاهش مقادیر سرعت و در نتیجه کاهش در مقدار قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب می‌باشد. در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته در شکل (۱۱-ب) وجود دو سلول چرخشی مشهود می‌باشد که یکی جریان ثانویه اصلی است و در جهت شیب چاله آبشستگی مشخص شده و دیگری جریان دیگری در خلاف جهت جریان اصلی، در ساحل خارجی و نزدیکی سطح آب می‌باشد و به دلیل وجود چاله آبشستگی و تغییر در الگوی جریان ثانویه، ورتیسیتی و قدرت جریان ثانویه نسبت به مقطع قبل افزایش می‌یابد. شکل (۱۲)، پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در انتهای قوس و در مقطع ۹۰ درجه را نشان می‌دهد. در قوس بدون آبشکن در شکل (۱۲-الف) سلول مرکزی جریان ثانویه مشاهده می‌گردد و تغییرات آن شباهت به تغییرات پروفیل عرضی سرعت در مقاطع ابتدایی قوس دارد. در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب، شکل (۱۲-ب) وجود سه سلول چرخشی که دو سلول آن در خلاف جهت جریان ثانویه اصلی است مشاهده می‌شود. همچنین در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته نیز در شکل (۱۲-ج) به دلیل وجود چاله آبشستگی، تنها جریان ثانویه در جهت شیب چاله به سمت ساحل داخلی مشهود است.

شکل (۱۰) پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۵/۵ درجه، نزدیک جان آبشکن و در فاصله معادل ۰/۲۵ طول آبشکن در پایین دست را نشان می‌دهد. در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب در شکل (۱۰-الف) نشان‌دهنده‌ی وجود جریان ثانویه‌ی اصلی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و جریان عرضی دیگری همجهت با جریان ثانویه اصلی و در محدوده‌ی بین بال آبشکن و ساحل خارجی مشهود است. همچنین در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته در شکل (۱۰-ب) ۵ جریان عرضی مشاهده می‌شود. دو جریان عرضی نزدیک بال و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، ناحیه‌ی جداشدگی جریان را تشکیل می‌دهند. همچنین جریان عرضی بین بال آبشکن و ساحل خارجی در این حالت نسبت به حالت بستر صلب از قدرت بیشتری برخوردار است. در این مقطع در حالت استقرار آبشکن به دلیل وجود ناحیه با سرعت‌های کم در پایین دست آبشکن و نزدیک ساحل خارجی قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی از افت محسوسی برخوردار می‌باشد. شکل (۱۱) پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقطع ۷۷/۵ درجه و در فاصله‌ی ۱/۲۵ برابر طول آبشکن در پایین دست را نشان می‌دهد. در قوس توأم با آبشکن با بستر صلب در شکل (۱۱-الف) سه سلول چرخشی مشاهده می‌شود. جریان ثانویه اصلی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و دو جریان عرضی دیگری، یکی همجهت جریان اصلی و دیگری در خلاف

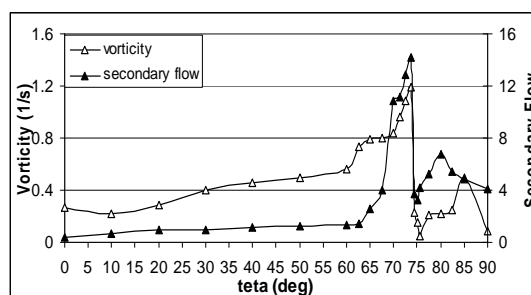
ورتیسیته در طول قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، قدرت جریان ثانویه از لحاظ مقدار، کمتر از مقدار ورتیسیته می‌باشد. روند تغییرات این دو پارامتر در طول قوس شبیه به هم بوده و در مقطع حدود ۷۴ درجه به مقدار حداکثر می‌رسند. این مقطع، گذرنده از لبه‌ی بال آبشکن بوده و بیشترین عمق آبشستگی نیز در همان ناحیه مشاهده شده است. سپس هر دو پارامتر تا مقطع ۸۲/۵ درجه‌ی روند نزولی دارند و در انتهای قوس نیز بنا به دلایل ذکر شده با یک نرخ کوچک، روند افزایشی خواهند داشت. شکل (۱۵) تغییرات جریان ثانویه و ورتیسیته در طول قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته را نشان می‌دهد. در طول قوس، مقدار عددی قدرت جریان ثانویه چند برابر مقدار متوسط ورتیسیته می‌باشد. در بستر توأم با چاله تعادل یافته، مقدار حداکثر هر دو پارامتر در مقطع حدود ۷۴ درجه و محل آبشستگی حداکثر می‌باشد. بررسی این مقادیر در نقطه‌ی اوج و در محل آبشستگی حداکثر، نشان می‌دهد که مقدار قدرت جریان ثانویه در حدود ۱۲ برابر مقدار متوسط ورتیسیته می‌باشد که دلیل آن به تعادل رسیدن چاله آبشستگی و آشفتگی کمتر در اطراف آبشکن می‌باشد و این باعث کاهش مقدار ورتیسیته می‌گردد؛ در حالی که قدرت جریان ثانویه به دلیل تمایل جریان به طرف شیب چاله آبشستگی و گسترش آن و در نتیجه افزایش مؤلفه‌های سرعت عرضی، افزایش می‌یابد. در مقطع ۷۴/۵ و ۷۵/۵ درجه که محدوده بال آبشکن می‌باشد، تغییرات این دو پارامتر نزولی است. از مقطع ۷۵/۵ درجه تا مقطع حدود ۸۲/۵ درجه به دلیل وجود چاله آبشستگی این دو پارامتر صعودی و در انتهای قوس به دلیل تأثیر مسیر مستقیم پایین دست، مجدداً نزولی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی قدرت جریان ثانویه و مقدار



شکل ۱۴ تغییرات جریان ثانویه و ورتیسیته در طول قوس با آبشکن و بستر صلب



شکل ۱۵ تغییرات جریان ثانویه و ورتیسیته در طول قوس با آبشکن و بستر تعادل یافته

شکل (۱۳) بیانگر تغییرات جریان ثانویه و ورتیسیته در طول قوس بدون آبشکن می‌باشد. همانطور که مشخص است، مقدار حداکثر جریان ثانویه و ورتیسیته متوسط در طول قوس در مقطع ۴۰ درجه می‌باشد که دلیل آن، این است که این نقطه محل برخورد خطوط جریان از مسیر مستقیم بالادست به ساحل خارجی می‌باشد. از مقطع ۴۰ درجه به بعد، قدرت جریان ثانویه نزولی است و از مقطع ۷۵ درجه تا انتهای قوس، این روند به صورت شدیدتری است که دلیل آن، نقطه‌ی برخورد دوم جریان موجود در قوس با ساحل خارجی در این محدوده می‌باشد. همچنین از مقطع ۴۰ درجه تا انتهای قوس در مقدار ورتیسیته روند نزولی مشاهده می‌گردد که دلیل آن انحنای خطوط جریان در نیمه دوم قوس و عدم تغییرات شدید در مسیر جریان در این فاصله است. شکل (۱۴) تغییرات جریان ثانویه و

بستر صلب، مقدار ورتیسیتی در این فاصله تقریباً ثابت است.

- در مقطع ۶۰ درجه وقوع سه سلول چرخشی در قوس توأم با آبشکن (بستر صلب و تعادل یافته) می باشد که سلول چرخشی سوم در نزدیکی ساحل خارجی و در جهت عقربه های ساعت شکل می گیرد.

- از مقطع ۶۰ تا ۷۰ درجه، قدرت جریان ثانویه در قوس بدون آبشکن از تغییرات اندکی برخوردار است و در قوس توأم با آبشکن، وجود حفره آبشستگی، باعث افزایش قدرت جریان ثانویه در حالت بستر تعادل یافته نسبت به بستر صلب می باشد. همچنین مقدار ورتیسیتی در این فاصله و در مورد قوس توأم با آبشکن از روند صعودی برخوردار است. البته در مقدار ورتیسیتی در قوس توأم با آبشکن و بستر صلب، ورتیسیتی بیشتری نسبت به قوس توأم با آبشکن و بستر تعادل یافته دارد. مقدار بدون بعد ورتیسیتی در این فاصله نشان دهنده ی افزایش مقدار ورتیسیتی در قوس توأم با آبشکن و کاهش مقدار ورتیسیتی در قوس بدون آبشکن است.

- در مقطع ۷۰ درجه، وجود دو سلول چرخشی در خلاف جهت یکدیگر در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب مشاهده می شود. در این مقطع، جریان ثانویه اصلی در قوس توأم با آبشکن با بستر تعادل یافته و در جهت شیب چاله آبشستگی شکل می گیرد. همچنین وقوع دو سلول چرخشی در خلاف جهت عقربه های ساعت و در خلاف جهت جریان ثانویه اصلی، بیانگر تأثیر آبشکن و چاله ی ایجاد شده می باشد.

- در مقطع ۷۰ تا ۹۰ درجه قدرت جریان ثانویه در قوس توأم با آبشکن با بستر تعادل یافته ابتدا تا مقطع ۷۳/۷۵ درجه و به فاصله ی ۰/۵ برابر طول آبشکن در بالا دست افزایش و به بیشترین مقدار خود می رسد، سپس قدرت جریان ثانویه کاهش می یابد و با بازشدگی دوباره ی مقطع قدرت جریان ثانویه تا مقطع ۸۰ درجه،

ورتیسیتی در طول قوس ۹۰ درجه بدون آبشکن و با آبشکن پرداخته شد. در حالت استقرار آبشکن نیز دو حالت، بستر صلب و بستر با چاله آبشستگی تعادل یافته، کمیت های ذکر شده محاسبه و نتایج زیر حاصل گردید.

- تا مقطع ۳۰ درجه قدرت جریان ثانویه در قوس بدون آبشکن و قوس با آبشکن (بستر صلب و بستر تعادل یافته) تقریباً با هم برابر است.

- افزایش جزئی میزان ورتیسیتی در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب در مقایسه با دو حالت دیگر (قوس بدون آبشکن و قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته) تا مقطع ۳۰ درجه مشاهده می شود.

- در مقطع ۳۰ درجه در قوس بدون آبشکن، الگوی جریان ثانویه شکل گرفته از ابتدای قوس با حرکتی به سمت ساحل خارجی در سطح آب و به سمت ساحل داخلی در نزدیک بستر مشاهده می شود، ولی در قوس توأم با آبشکن جریان ثانویه اصلی به دو سلول چرخشی مجزا با جهتی خلاف جهت عقربه های ساعت تبدیل شده است. همچنین جریان ثانویه دوم در خلاف جهت جریان اصلی، در نزدیکی ساحل خارجی و در لایه های نزدیک سطح آب شکل می گیرد. این جریان در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته، از محدوده عملکرد بیشتری نسبت به قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب برخوردار است.

- از مقطع ۳۰ درجه تا مقطع ۶۰ درجه قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتی در قوس بدون آبشکن و قوس توأم با آبشکن (بستر صلب و تعادل یافته) به هم نزدیک می باشد. همچنین مقدار ورتیسیتی در قوس بدون آبشکن بیانگر روند صعودی و سپس نزولی است. در بین مقطع ۴۰ و ۴۵ درجه، بیشترین مقدار ورتیسیتی وجود دارد و سپس روند نمودار نزولی است. در بین مقاطع ۳۰ تا ۶۰ درجه، مقدار ورتیسیتی در حالت قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته صعودی بوده؛ در حالی که در قوس توأم با آبشکن و با

- این روند در مورد آبشکن با بستر تعادل یافته نیز دیده می‌شود.
- در مقطع ۷۵/۵ درجه، نزدیک جان آبشکن و در فاصله‌ی معادل ۰/۲۵ طول آبشکن در پایین‌دست، در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب، وجود جریان ثانویه اصلی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و جریان عرضی دیگری همجهت با جریان ثانویه اصلی و در محدوده‌ی بین بال آبشکن و ساحل خارجی مشهود است. همچنین در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته، پنج جریان عرضی مشاهده می‌شود.
- در مقطع ۷۷/۵ درجه و در فاصله‌ی ۱/۲۵ برابر طول آبشکن در پایین دست، در قوس توأم با آبشکن با بستر صلب سه سلول چرخشی مشاهده می‌شود. جریان ثانویه‌ی اصلی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و دو جریان عرضی دیگر، یکی همجهت جریان اصلی و دیگری در خلاف جهت جریان اصلی در این مقطع تشکیل می‌گردد. در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته وجود دو سلول چرخشی مشهود می‌باشد؛ یکی جریان ثانویه اصلی که در جهت شیب چاله آبشستگی مشخص شده و دیگری جریان دیگری در خلاف جهت جریان اصلی در ساحل خارجی و نزدیکی سطح آب.
- در مقطع ۹۰ درجه و در قوس بدون آبشکن سلول مرکزی جریان ثانویه مشاهده می‌گردد و تغییرات آن شباهت به تغییرات پروفیل عرضی سرعت در مقاطع ابتدایی قوس دارد. در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب، وجود سه سلول چرخشی که دو سلول آن در خلاف جهت جریان ثانویه اصلی است، مشاهده می‌شود. همچنین در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته نیز به دلیل وجود چاله‌ی آبشستگی، تنها جریان ثانویه در جهت شیب چاله به سمت ساحل داخلی مشهود است.
- در طول قوس بدون آبشکن، مقدار حداکثر جریان ثانویه

- معادل ۲/۵ برابر طول آبشکن به طرف پایین دست افزایش می‌یابد و سپس تا انتهای قوس نزولی می‌باشد.
- این روند در مورد قوس توأم با آبشکن با بستر صلب با نسبت کمتر تا انتهای بال پایین‌دست مشاهده می‌شود و از این مقطع تا انتهای قوس، صعودی می‌باشد. در قوس بدون آبشکن نیز روند نزولی با نسبت به مراتب کمتر در مقایسه با قوس توأم با آبشکن مشاهده می‌گردد. روند ذکر شده در مورد تغییرات ورتیسیتی نیز در این محدوده مشاهده می‌شود. در این محدوده مقدار ورتیسیتی در قوس توأم با آبشکن با مقطع صلب بیشتر از قوس توأم با آبشکن با بستر تعادل یافته می‌باشد. در قوس بدون آبشکن نیز مقدار ورتیسیتی از روند نزولی و با مقادیر کمتر نسبت به حالت استقرار آبشکن برخوردار است.
- در مقطع ۷۳/۷۵ درجه، در جلو بال آبشکن و در فاصله‌ی معادل ۰/۶ طول آبشکن در بالادست، وجود دو سلول چرخشی مجزا در قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب با جهت خلاف عقربه‌های ساعت و یک سلول چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت در جلو بال آبشکن مشاهده می‌گردد. در همین مقطع و در قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته، دو سلول چرخشی مشاهده می‌شود که یکی جریان ثانویه اصلی، در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و در جهت شیب چاله آبشستگی بوده و دیگری جریان ثانویه دوم ناشی از گردابه‌های به وجود آمده در بالادست آبشکن و در جهت عقربه‌های ساعت می‌باشد.
- در مقطع ۷۴/۵ درجه، نزدیک جان آبشکن و در فاصله معادل ۰/۲۵ طول آبشکن در بالادست، وجود چهار سلول چرخشی در این مقطع در قوس با آبشکن با بستر صلب مشاهده می‌شود. وجود دو سلول چرخشی با جهت‌های مخالف در محدوده‌ی بین بال و ساحل خارجی و اثر متقابل آن‌ها بر روی هم در کاهش مقادیر قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی مؤثر می‌باشد.

۸۲/۵ درجه روند نزولی دارند و در انتهای قوس نیز روند افزایشی خواهند داشت.

- تغییرات جریان ثانویه و ورتیسیتی در طول قوس توأم با آبشکن و با بستر تعادل یافته بیانگر این است که مقدار قدرت جریان ثانویه در نقطه اوج و در محل آبشستگی حداکثر در حدود ۱۲ برابر مقدار متوسط ورتیسیتی می‌باشد، در مقطع ۷۴/۵ و ۷۵/۵ درجه که محدوده بال آبشکن می‌باشد، تغییرات این دو پارامتر نزولی است. از مقطع ۷۵/۵ درجه تا مقطع حدود ۸۲/۵ درجه، این دو پارامتر صعودی و در انتهای قوس مجدداً نزولی می‌باشد.

و ورتیسیتی متوسط در طول قوس در مقطع ۴۰ درجه می‌باشد از مقطع ۴۰ درجه تا مقطع ۷۵ درجه، قدرت جریان ثانویه نزولی است و از مقطع ۷۵ درجه تا انتهای قوس، این روند به صورت تدریجی صعودی است. همچنین از مقطع ۴۰ درجه تا انتهای قوس در مقدار ورتیسیتی روند نزولی مشاهده می‌گردد.

- تغییرات جریان ثانویه و ورتیسیتی در طول قوس توأم با آبشکن و با بستر صلب، بیانگر این است که قدرت جریان ثانویه از لحاظ مقدار، کمتر از مقدار ورتیسیتی می‌باشد. روند تغییرات این دو پارامتر در طول قوس شبیه به هم بوده و در مقطع حدود ۷۳/۷۵ درجه به مقدار حداکثر می‌رسند، سپس هر دو پارامتر تا مقطع

مراجع

1. Berge, M. A., "Flow Processes in a Curved Alluvial Channel" phd. Thesis in Iowa University, USA, 365p. (1990).
2. Blanckaert K., and Graf, W.H., "Mean Flow and Turbulence in Open-Channel Bend" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 10, PP, 126-138. (2001).
3. Barbhuiya, A.K., and Dey, S., "Turbulent Flow Measurement by the ADV in the Vicinity of a Rectangular Cross-Section Cylinder Placed at a Channel Side Wall" *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol. 15, No.4, PP. 221-237. (2004).
4. Dey, S., and Barbhuiya, A.K., "Turbulent Flow Field in a Scour Hole at a Semi Circular Abutment" *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 32, No.1, P. 213-232. (2005).
5. Dey, S an" *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol.17, PP. 13-21. (2006).
6. Lian, H. C., and Hsied, T.Y., and Yang, J. C., "Bend-Flow Simulation Using 2d Depth - Averaged Mode" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 10. (1999).
7. Marion, A., and Zaramella, M., "Effects of Velocity Gradients and Secondary Flow on the Dispersion of Solutes in a Meandering Channel" *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol, 132. PP, 1295-1302. (2006).
8. Nouh, M. A., and Townsend, R. D., "Shear-Stress Distribution in Stable Channel Bends", *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 105, No. HY.10. (1979).
9. Rodi, W., and Michael, A.Leschziner., "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow", *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 105, No. HY10. (1978).

10. Shukry, A., "Flow around Bends in an open flume" Transactions, ASCE, Vol. 115. (1950).
11. Tang, XL., Chen, ZC., and Yang, F., "Dynamic Large Eddy Simulation of Secondary Flow Near a Groyne", *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical simulation*, Vol.7, No.3, 257-262.(2006).
12. Yang, S. Q., "Interactions of Boundary Shear Stress, Secondary Currents and Velocity", *Fluid Dynamics Research*, Vol.36, PP, 121-136. (2005).
13. Ghodsian, M., and Vaghefi, M., "Experimental Study on Scour and Flow Field in a Scour Hole Aaround a T Shaped Spur Dike in a 90° Bend", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 24, No. 2, PP. 145-158.(2009).
14. Vaghefi, M., and Ghodsian, M., Salehi Neyshaboori, S. A. A., "Experimental Study on the Effect of a T-Shaped Spur Dike Length on Scour in a 90° Cannel Bend", *Arabian Journal Of Science and Technology*, Vol. 34, No. 2B, PP. 337-348.(2009).
۱۵. واقفی؛ محمد، قدسیان؛ مسعود، صالحی نیشابوری؛ سیدعلی اکبر. " مطالعه آزمایشگاهی الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل منفرد مستقر در قوس 90 درجه " مجله علمی و پژوهشی منابع آب ایران، سال چهارم، شماره ۳، ۴۱-۵۷. (۱۳۸۷).
۱۶. واقفی؛ محمد، قدسیان؛ مسعود، صالحی نیشابوری؛ سیدعلی اکبر. " بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان کمی اطراف آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب " مجله علمی و پژوهشی دانشگاه تبریز، جلد ۳۷، شماره ۳، ۷۵-۸۱. (۱۳۸۷).
۱۷. واقفی؛ محمد، قدسیان؛ مسعود، صالحی نیشابوری؛ سیدعلی اکبر. " بررسی آزمایشگاهی اثر شعاع انحنا و موقعیت استقرار آبشکن T شکل منفرد در قوس 90 درجه بر میزان آبشستگی اطراف آنها " مجله علمی و پژوهشی هیدرولیک ایران، دوره چهارم، شماره ۱، ۹۱-۱۰۷. (۱۳۸۸).
۱۸. واقفی؛ محمد، قدسیان؛ مسعود، صالحی نیشابوری؛ سیدعلی اکبر. " مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی و آبشستگی در قوس ۹۰ درجه " مجله علمی و پژوهشی هیدرولیک ایران، دوره سوم، شماره ۳، ۴۱-۵۷. (۱۳۸۷).