

# مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر متحرک

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

<sup>۱</sup> استادیار سازه‌های هیدرولیکی گروه مهندسی عمران - دانشگاه خلیج فارس

<sup>۲</sup> استاد هیدرولیک پژوهشکده مهندسی آب - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۷/۲/۲۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱۰/۱، تاریخ تصویب ۸۹/۲/۴)

## چکیده

در این مقاله به اندازه‌گیری آزمایشگاهی میدان جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه پرداخته شده است. آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی با شعاع انحنای ملایم انجام گرفته است. در اندازه‌گیری میدان جریان از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV و در اندازه‌گیری توپوگرافی بستر از خطکش الکترونیکی استفاده شد. برای این هدف ابتدا آزمایش آبشستگی انجام شد و توپوگرافی قوس توأم با چاله آبشستگی تعادل یافته در اطراف آبشکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه برداشت شد و سپس الگوی سه‌بعدی متوسط زمانی سرعت اندازه‌گیری شد. مقایسه بین مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت در مقاطع مختلف انجام شد و تفاوت الگوی جریان در طول قوس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مشاهده‌ها بیانگر وجود تأثیر آبشکن و توپوگرافی بستر در برهم زدن الگوی جریان آ ثانویه و شکل‌گیری جریان ثانویه دوم در مقطع ۳۰ درجه و در خلاف جهت جریان ثانویه اول است. همچنین جریان‌های ثانویه اصلی در جهت پیشروی شیب حفره آبشستگی شکل می‌گیرد و گردابه‌های افقی با جهت خلاف عقربه‌های ساعت و در بالا دست آبشکن در لایه‌های مختلف مشاهده می‌شود. همچنین آبشکن باعث انحراف مسیر سرعت بیشینه به سمت ساحل داخلی می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** الگوی جریان، آبشکن T شکل، جریان ثانویه، قوس ۹۰ درجه، الگوی آبشستگی

## مقدمه

تشکیل می‌شود. این الگوی جریان باعث ایجاد آشفتگی شدید جریان می‌شود و تأثیر زیادی بر مورفولوژی قوس رودخانه می‌گذارد، به طوری که سرعت بالای جریان در قوس بیرونی باعث فرسایش بستر رودخانه و ساحل خارجی و در نتیجه تخریب آن می‌شود. در این بین یکی از راه‌های تثبیت ساحل خارجی رودخانه‌ها استفاده از آبشکن است. هنگامی که از آبشکن‌ها برای محافظت جداره رودخانه در خم‌ها و یا برای اهدافی دیگر نظیر حفظ الگوی جریان استفاده می‌شود، تحلیل جریان و آبشستگی در اطراف آبشکن‌های استفاده‌شده در قوس خارجی بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌شود که دلیل آن اندرکنش بین الگوی جریان در قوس و الگوی جریان اطراف آبشکن و تأثیر جریان‌های حلزونی در قوس‌ها است. در این بین پی بردن به هیدرودینامیک جریان می‌تواند از نظر کاربردی بسیار پر اهمیت باشد. در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی تعیین پروفیل‌های سه‌بعدی سرعت و الگوی آبشستگی<sup>۳</sup> پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه پرداخته شده است. برای این هدف ابتدا آزمایش آبشستگی انجام گرفته و توپوگرافی بستر برداشت شده

مسیر رودخانه‌ها در طبیعت توأم با قوس‌ها و پیچان‌رودها است و به طور معمول قسمت‌های خمیده یک رودخانه از جمله بازه‌های بحرانی در شناسایی رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ها است. 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 است که این پدیده منجر به یکنواخت نبودن پروفیل سرعت در جهت قائم می‌شود. در اثر نیروی گریز از مرکز و اندرکنش آن با گرادیان‌های جانبی فشار ناشی از شیب جانبی سطح آب، جریانی تشکیل می‌شود که به جریان ثانویه موسوم است. در این جریان، آب در قسمت بالایی رودخانه به طرف بیرون رانده می‌شود و در قسمت پایین به سمت قوس داخلی حرکت می‌کند. در اثر اندرکنش بین جریان‌های ثانویه و یکنواخت نبودن پروفیل سرعت در عمق، الگوی جریانی به نام جریان حلزونی

است و سپس با استقرار آبشکن در موقعیت ۷۵ درجه و بستر با چاله آبشستگی تعادل یافته، الگوی جریان در مقاطع و پلان‌های مختلف و با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی ADV<sup>۴</sup> اندازه‌گیری شد.

### مروری بر تحقیقات گذشته

درباره الگوی جریان و آبشستگی در کانال‌های قوسی تحقیقات زیادی انجام شده است. اما درباره اندازه‌گیری جریان پیرامون سازه‌های هیدرولیکی مستقر در رودخانه‌ها مانند آبشکن و کوله پل مطالعات انجام‌گرفته محدود بوده و این مطالعات نیز اغلب در مسیرهای مستقیم است. احمد و راجراتنام [۱] در سال ۲۰۰۰ به بررسی خصوصیات جریان اطراف کوله پل‌ها در مسیرهای مستقیم پرداختند. دی [۲] در سال ۱۹۹۵ به بررسی میدان جریان سه‌بعدی در اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای پرداخت. دی و بار باحیوا [۳، ۴] در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه‌بعدی، تعیین تنش‌های رینولدزی، میزان آشفستگی و میدان جریان آشفته در اطراف کوله پل با مقطع نیم دایره، مستطیلی و ذوزنقه‌ای در مسیر مستقیم پرداختند. فرقانی و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۷ به اندازه‌گیری آزمایشگاهی دو بعدی سرعت پیرامون آبشکن‌های منفرد مستقر در قوس ۹۰ درجه پرداخت. گیری و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۴ به بررسی آزمایشگاهی و عددی شبیه‌سازی جریان و آشفستگی در فلولمی شبیه به رودخانه‌های مائندری با وجود آبشکن‌های غیرمستغرق پرداختند. ایشان با (ADV) به اندازه‌گیری سرعت با تغییر دادن موقعیت آبشکن‌ها پرداختند و تأثیر آن را روی میدان جریان اطراف آبشکن مد نظر قرار دادند و میدان گردابه‌ها و شدت آشفستگی را با تکنیک درون‌یابی درجه سوم شبه ذره (CIP) و به شکل دوبعدی اندازه‌گیری کردند. قدسیان و واقفی [۸] در سال ۲۰۰۹ به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه پرداختند و همچنین سعی کردند ارتباط بین الگوی جریان و آبشستگی برقرار کنند. گراف [۹] در سال ۲۰۰۲ به بررسی میدان جریان سه‌بعدی و نقش گردابه‌ها در تشکیل حفره آبشستگی اطراف پایه‌های استوانه‌ای پرداخت. ملویل [۱۰] در سال ۱۹۷۷ به مطالعه خصوصیات جریان در حفره آبشستگی موضعی اطراف پایه پل مستقر در مسیر مستقیم پرداخت.

راجراتنام و ناواچوکوا [۱۱] در سال ۱۹۸۳ رفتار جریان در اطراف سازه‌هایی شبیه به آبشکن و مستقر در مسیر مستقیم را تحقیق و بررسی کردند. سلاجقه [۱۲] در سال ۲۰۰۳ به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان دو بعدی در اطراف آبشکن‌های مستقر در قوس ۱۸۰ درجه و با بستر صلب پرداخت. تینگسانچالی و ماهاسواران [۱۳] در سال ۱۹۹۰ از یک مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  دوبعدی (2D) متوسط‌گیری شده در عمق که برای اثر انحنای خط جریان اصلاح شده بود، برای حل معادلات حاکم در نزدیکی آبشکن استفاده کردند. واقفی و همکاران نیز در سال ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ [۱۴، ۱۵، ۱۶] به بررسی ابعاد چاله آبشستگی و تغییرات توپوگرافی بستر پیرامون آبشکن T شکل و تحت تأثیر تغییرات عواملی نظیر طول آبشکن، طول بال آبشکن، شکل بال آبشکن و عدد فرود جریان پرداختند و روابطی مناسب نیز در مورد این عوامل ارائه کردند. مطالعات گذشته بیانگر نبود تحقیقات کافی درباره آبشکن‌های مستقر در قوس است. در این بین روی الگوی جریان و آبشستگی اطراف آبشکن T شکل در قوس و ارتباط بین آنها نیز مطالعات محدودی انجام شده است. در این تحقیق علاوه بر اینکه جریان به شکل سه‌بعدی اندازه‌گیری شده، به کارگیری آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه و ارتباط بین الگوی جریان و آبشستگی از نوآوری‌های تحقیق است.

### آزمایش‌ها

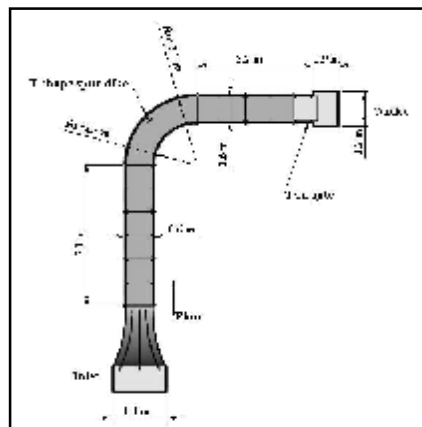
آزمایش‌های مورد نظر در کانالی با قوس ۹۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد. شکل (۱) پلان و هندسه قوس مورد نظر را نشان می‌دهد. این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۷/۱ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۵/۲ متر در پایین دست تشکیل می‌شود که این دو مسیر مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای خارجی ۲/۷ متر به هم متصل شده است. کانال از جنس شیشه ساخته شده است که توسط قاب‌های فولادی پایدار آن حفظ می‌شوند. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر ۴۰، ارتفاع آن ۷۰ و عرض آن ۶۰ سانتی‌متر است. کف کانال از رسوباتی با قطر متوسط معادل ۱/۲۸ میلی‌متر و انحراف معیار ۱/۳ میلی‌متر تا عمق ۳۵ سانتی‌متری پوشیده شده است. دبی جریان به وسیله یک ارفیس کالیبره‌شده تنظیم

از بالادست و پایین دست کانال جاری می‌شد. در طی این مدت یک دریچه کشویی در جلوی دریچه قطاعی کانال قرار می‌گرفت که وظیفه آن جلوگیری از خروج آب از کانال بود. پس از بالا آمدن سطح آب در کانال، به طور تدریجی جریان به دبی مورد نظر افزایش یافت. سپس دریچه کشویی به طور تدریجی از جلوی مسیر جریان خارج می‌شد. مقدار جریان در طول آزمایش توسط ارفیس نصب شده در کنار کانال تنظیم می‌شد. مدت زمان برداشت پروفیل سرعت یک هفته بوده و در این فاصله، برداشت مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان در ۲۳ مقطع عرضی در طول قوس و ۸ تراز افقی انجام گرفت که ۳ تراز آن در داخل چاله آبستنگی بود. همچنین در هر مقطع عرضی ۱۸ نقطه قرائت شده است. شبکه بندی ذکر شده غیر یکنواخت بوده و در نزدیکی آبشکن ریزتر است. در اندازه گیری سرعت، از دستگاه سرعت سنج سه بعدی ADV استفاده شده است. از مشخصات این دستگاه، اندازه گیری جریان در فاصله ۵ سانتی متری نوک حسگر آن است. به همین دلیل در اندازه گیری سرعت در نزدیکی سطح جریان از حسگر جانب نگر<sup>۵</sup> و در لایه های دیگر از حسگر پایین نگر<sup>۶</sup> استفاده شده است. دستگاه سرعت سنج روی فرکانس ۵۰ هرتز تنظیم شد و مدت زمان اندازه گیری هر نقطه از شبکه بندی تعریف شده یک دقیقه بوده است. در هر نقطه و در هر جهت سرعت خروجی این دستگاه ۳۰۰۰ داده بوده که این داده ها توسط نرم افزارهای جانبی vectarino و explore v متوسط گیری می‌شود و پروفیل های سرعت با استفاده از متوسط های ارائه شده ترسیم می‌شود. در نقاط نزدیک آبشکن و برای قرائت سرعت جریان در اطراف بال و جان آبشکن، نمونه گیر سرعت در جهت های مختلف قرار داده شد. همچنین سرعت های برداشت شده در طول قوس ۹۰ درجه از مختصات قطبی به مختصات دکارتی تبدیل شد. مشاهده های کیفی (تزییق مواد رنگی، حرکت روبان های رنگی و تزریق براده چوب) نیز برای مشاهده الگوی جریان انجام شد.

### نتایج و مشاهدات

تغییرات توپوگرافی بستر و شکل گیری چاله آبستنگی اطراف آبشکن، ارتباط مستقیمی با تأثیر وجود آبشکن بر الگوی جریان دارد. در اینجا به تجزیه و تحلیل تغییرات

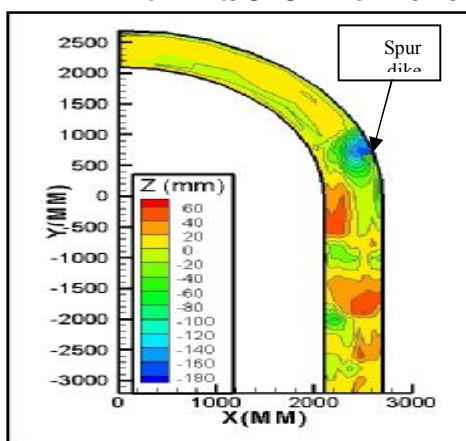
شد. برای کنترل جریان از یک دریچه قطاعی که در انتهای کانال نصب شده است، استفاده شد. آبشکن به شکل صفحات مستطیلی با پلان T شکل و از جنس پلکسی گلاس است. ضخامت آبشکن ۱ سانتی متر و ارتفاع آن ۶۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. طول آبشکن ۱۲ سانتی متر و طول بال آبشکن نیز ۱۲ سانتی متر است.



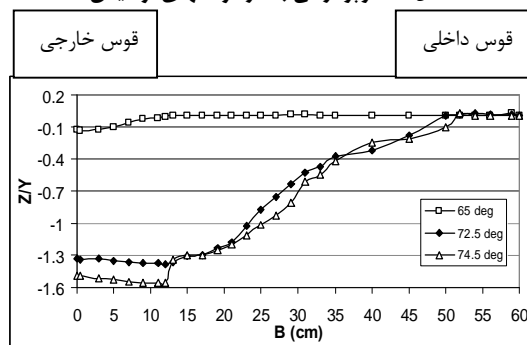
شکل ۱: پلان کانال آزمایشگاهی مورد نظر.

آزمایش های مقدماتی انجام شده در قوس بدون آبشکن، بیانگر وجود محدوده آبستنگی بین زاویه ۷۰ تا ۸۰ درجه از ساحل خارجی و در قوس ۹۰ درجه است، به همین دلیل آبشکن در موقعیت ۷۵ درجه مستقر شد. دبی جریان در کلیه آزمایش ها ثابت و برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه است و آزمایش ها در شرایط آب زلال انجام گرفت. زمان تعادل آزمایش ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. ابتدا در مدت زمان تعادل که ۲۴ ساعت بود، آبستنگی اطراف آبشکن و تغییرات توپوگرافی بستر در قوس به تعادل رسید و با استفاده از خطکش الکترونیکی توپوگرافی بستر در ۴۸ مقطع و هر مقطع شامل ۳۰ نقطه برداشت شد. سپس در مدت زمان ۱۲ ساعت بستر خشک شد. پس از خشک شدن بستر، چسب مخصوصی با استفاده از دستگاه رنگ پاش به طور ملایم روی بستر تعادل یافته پاشیده شد. خروجی دستگاه رنگ پاش طوری تنظیم شد که بستر تعادل یافته آسیب ندیده و توپوگرافی تعادل یافته حفظ شود. همچنین با استفاده از دمنده های هوا و در مدت ۱۲ ساعت چسب مخصوص خشک شد. پس از خشک شدن، بستری مشابه بستر اولیه و با زبری مشابه به دست می‌آید. مدت زمان اشباع کانال بین ۲۰ تا ۳۰ دقیقه است. برای حفظ بستر در شروع آزمایش، آب توسط لوله

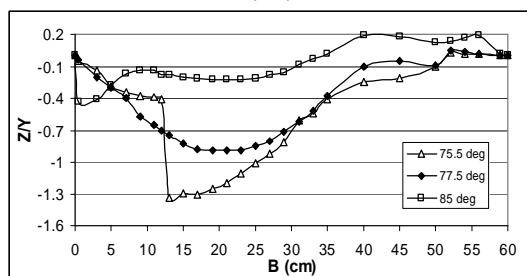
مقاطع ۷۷/۵ و ۸۵ درجه در شکل (۳-ب) بیانگر وقوع آبشستگی در ساحل خارجی در انتهای قوس و بعد از رسوبگذاری در پایین دست آبشکن است. شکل (۴) نیز چند مقطع طولی (از زاویه ۶۰ تا ۹۰ درجه) و در فواصل مختلف از ساحل خارجی را نشان می‌دهد. شکل (۴-الف) نمونه‌ای از مقاطع طولی در محدوده استقرار آبشکن (فواصل ۳، ۹، ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متری از ساحل خارجی) را نشان می‌دهد و بیانگر آبشستگی ناچیز در نزدیکی ساحل خارجی و تا فاصله حدود سه برابر طول آبشکن و سپس افزایش آبشستگی به سمت انتهای قوس است. در حالی که در اطراف بال آبشکن این روند متفاوت است.



شکل ۲: توپوگرافی بستر در انتهای آزمایش.



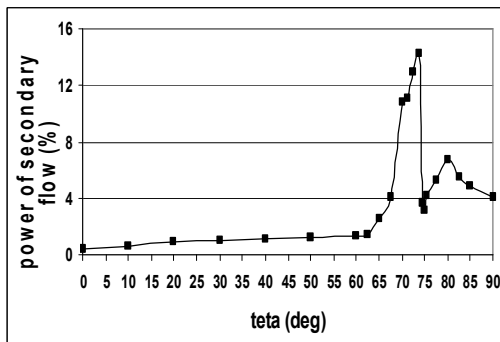
(الف)



(ب)

شکل ۳: نمونه‌ای از تغییرات توپوگرافی بستر در مقاطع عرضی (الف) بالادست و (ب) پایین دست آبشکن.

توپوگرافی بستر و الگوی جریان پرداخته می‌شود. با استقرار آبشکن در قوس خارجی، تنگ‌شدگی در مقطع جریان ایجاد می‌شود. این موضوع باعث افزایش قدرت گردابه‌ها و تنش برشی در دماغه آبشکن و محدوده بین دیواره بال بالادست آبشکن و جان آبشکن می‌شود. شروع آبشستگی از دماغه آبشکن آغاز می‌شود. در ابتدای آزمایش جریان‌های لایه‌های بالایی به شکل جریان رو به پایین به سمت بستر متمایل می‌شود. همزمان با این حرکت، جریان در لایه نزدیک بستر شروع به جداسازی ذرات بستر می‌کند. رسوبات جدا شده توسط لایه‌های پایینی جریان، توسط جریان رو به پایین لایه‌های بالایی به سمت پایین دست حرکت می‌کند. پیشروی چاله آبشستگی در ابتدا سرعت زیادی دارد، به طوری که در یک ساعت اول آزمایش بیش از ۵۰ درصد آبشستگی بیشینه<sup>۷</sup> شکل می‌گیرد. رسوبات خروجی از چاله آبشستگی در طول آزمایش در دو مسیر اصلی حرکت می‌کنند. قسمتی از رسوبات با زاویه حدود ۳۰ درجه نسبت به بال آبشکن و در جهت حرکت عقربه‌های ساعت به سمت وسط کانال و در ادامه به طرف ساحل خارجی متمایل می‌شوند. قسمتی دیگر به سمت ساحل داخلی و پایین دست آبشکن حرکت می‌کنند. این بخش از رسوبات یک پشته رسوبی تشکیل می‌دهند و ریزش جریان از روی این پشته رسوبی به سمت بستر، باعث تشکیل حفره آبشستگی دوم در پایین دست آبشکن می‌شود. پشته رسوبی ذکر شده و چاله آبشستگی دوم، در طول آزمایش به سمت پایین دست حرکت می‌کنند. وقتی تغییرات توپوگرافی بستر به مسیر مستقیم پایین دست رسید، رسوبات با نرخ بیشتری حرکت می‌کنند و باعث کم شدن عمق چاله آبشستگی دوم می‌شود که دلیل آن تأثیر مسیر مستقیم پایین دست قوس در کاهش انحنای خطوط جریان است. در شکل (۲) توپوگرافی بستر در انتهای آزمایش نشان داده شده است. همچنین شکل (۳) نشان‌دهنده نمونه‌ای از تغییرات توپوگرافی بستر در مقاطع مختلف عرضی بالادست و پایین دست آبشکن است. در این شکل X و Y مختصات نقاط مختلف قوس را نشان می‌دهد و Z بیانگر میزان آبشستگی در نقاط مختلف و بر حسب میلی‌متر است. مقایسه شکل (۳-الف) و (۳-ب) در مقاطع ۷۴/۵ و ۷۵/۵ درجه بیانگر تأثیر وجود بال آبشکن در کاهش آبشستگی بالادست و پایین دست آبشکن است. همچنین مقایسه

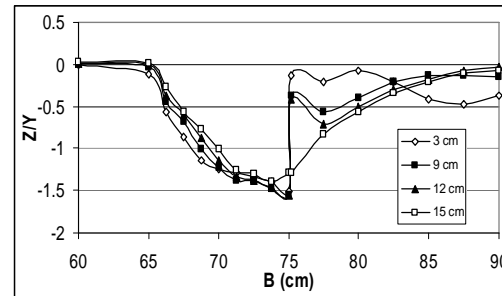


شکل ۶: مقادیر قدرت جریان ثانویه در طول قوس و در مقاطع مختلف.

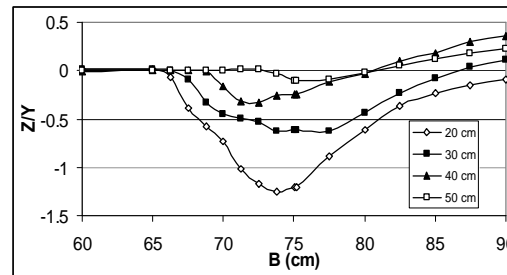
همان‌طور که اشاره شد، جریان تأثیرگذار در مسیرهای قوسی جریان‌های ثانویه است که اندرکنش آن با جریان‌های طولی سبب تشکیل جریان حلزونی در طول قوس می‌شود. استقرار آبشکن در طول قوس، باعث به وجود آمدن تغییراتی در الگوی جریان ثانویه و تشکیل جریان‌های پیچیده‌ای در اطراف آبشکن می‌شود. چاله آبشستگی اطراف آبشکن و تغییرات به وجود آمده در توپوگرافی بستر نیز در نتیجه پیدایش جریان‌های شکل گرفته است. 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 ۱۹۴۹ با انجام مطالعاتی روی جریان در قوس رودخانه، ضمن تشریح مکانیسم جریان ثانویه، برای بحث کمی روی این پدیده، معیار زیر را برای قدرت جریان ثانویه معرفی کرده است:

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

این معیار در یک مقطع عرضی معین عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی. در این معادله  $S_{xy}$  بیانگر قدرت جریان ثانویه،  $K_{main}$  و  $K_{lateral}$  به ترتیب نشان‌دهنده انرژی جنبشی جریان جانبی و انرژی جنبشی جریان اصلی هستند. قدرت جریان ثانویه بیانگر تمایل جریان برای حرکت به سمت ساحل خارجی در مسیرهای قوسی است. در شکل (۶) قدرت جریان ثانویه در طول قوس نشان داده شده است.

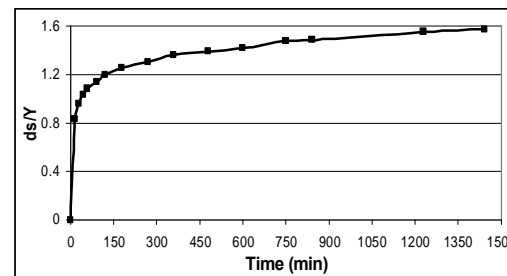


(الف)



(ب)

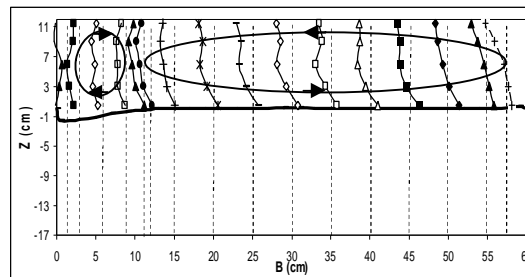
شکل ۴: نمونه‌ای از تغییرات توپوگرافی بستر در مقاطع طولی (الف) در محدوده آبشکن و (ب) فاصله بال تا ساحل داخلی.



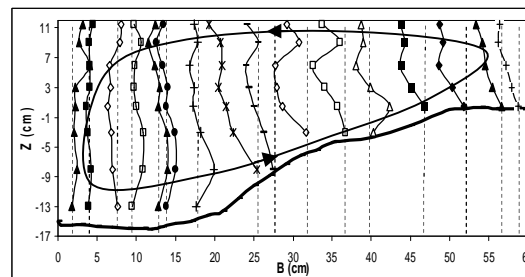
شکل ۵: نمودار تغییرات زمانی عمق آبشستگی بی بعد شده با عمق جریان.

همچنین شکل (۴-ب) نمونه‌ای از مقاطع طولی بعد از محدوده آبشکن (۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری از ساحل خارجی) و میزان پیشروی چاله به سمت بالادست و پایین‌دست و در عرض کانال را نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌شود با حرکت به سمت ساحل داخلی، رسوبگذاری در انتهای قوس مشاهده می‌شود. شکل (۵) نمودار تغییرات زمانی عمق آبشستگی بی‌بعد شده را با عمق جریان  $(ds/Y)$  در محل وقوع بیشترین آبشستگی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که محل آبشستگی بیشینه در نزدیکی دیواره داخلی بال بالادست و به فاصله معادل ۱۵ درصد طول آبشکن از دماغه بال است.

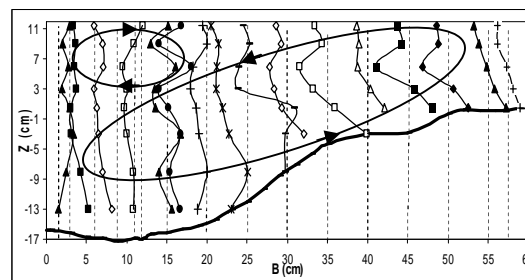
نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقاطع مختلف بالادست آبشکن نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود در مقطع ۶۵ درجه، شروع شکل‌گیری حفره آبستگی بوده و جریان ثانویه دوم قدرت کمتری داشته و این به دلیل افزایش قدرت جریان ثانویه اصلی در فاصله ۶۰ تا ۷۰ درجه است (شکل (۶)). در مقطع ۷۲/۵ درجه همان طور که در شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود، جریان ثانویه در جهت شیب چاله آبستگی شکل گرفته و عاملی در جهت گسترش عرضی چاله است. شکل (۷-ج) مقطع جلو بال بالادست آبشکن را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده مسیر خطوط جریان در لایه‌های بالایی و نزدیک به ساحل خارجی به سمت وسط کانال و تشکیل ناحیه جدادگی جریان است و جریان ثانویه اصلی نیز با شدت بیشتر به پیشروی چاله کمک می‌کنند. شکل (۷-د) مقطع نزدیک جان آبشکن را نشان می‌دهد. در داخل محدوده بین بال بالادست و ساحل خارجی دو گردابه با جهت مخالف هم شکل می‌گیرد. در لایه‌های پایین گردابه‌ای در خلاف جهت عقربه‌های ساعت وجود دارد که ناشی از جریان‌های رو به بالا است. این جریان با چرخش به سمت ساحل خارجی تمایل به خارج شدن از مسیر بن بست ناشی از جان آبشکن و حرکت در مسیر اصلی جریان را دارد و باعث این گردابه می‌شود. گردابه دوم در لایه‌های بالایی در جهت عقربه‌های ساعت شکل می‌گیرد و به دلیل فشار کمتر در سطح جریان به صورت رو به بالا است. همچنین جریان ثانویه اصلی در ناحیه بین دیواره بال و ساحل داخلی در جهت شیب حفره آبستگی تشکیل می‌شود. در نزدیکی بال و در سطح جریان نیز گردابه کوچکی شکل می‌گیرد که به دلیل فشار مطلوب در نزدیکی بال هم‌جهت با جریان ثانویه اصلی است. شکل (۸) نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقاطع مختلف پایین دست آبشکن را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) مشاهده می‌شود، در مقطع جلو بال آبشکن، جریان ثانویه در جهت گسترش شیب حفره آبستگی شکل می‌گیرد و به دلیل تنگ‌شدن مقطع و تمرکز تنش در دماغه آبشکن پیشروی آبستگی در عرض کانال در این ناحیه بیشترین مقدار را دارد. این روند در پروفیل بستر و در شکل (۳-الف) و (۳-ب) نیز مشخص است.



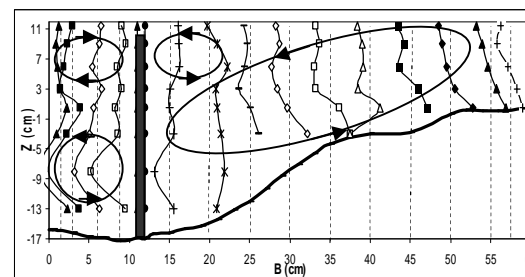
(الف)



(ب)



(ج)



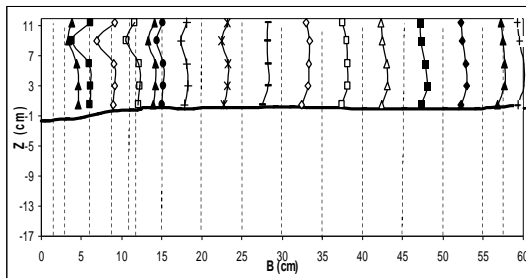
(د)

شکل ۷: نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقاطع مختلف بالادست آبشکن (الف) ۶۵ (ب) ۷۲/۵ (ج) ۷۳/۷۵ و (د) ۷۴/۵ درجه.

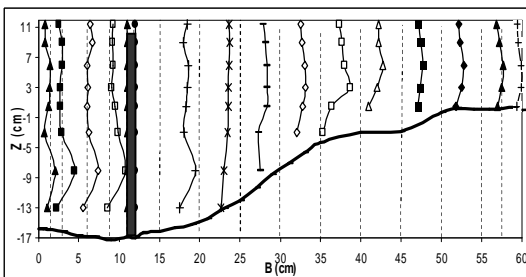
با شروع قوس جریان ثانویه در مقاطع ابتدایی مشهود است. در مقطع ۳۰ درجه جریان ثانویه دومی در خلاف جهت جریان ثانویه اول شکل می‌گیرد. دلیل این جریان وقوع جریان‌های رو به بالا در نزدیکی ساحل خارجی و در لایه‌های میانی تا لایه‌های سطح آب است. در شکل (۷)

ساحل داخلی می‌شود. دلیل این پدیده رسوبگذاری در ساحل داخلی و آبشستگی در ساحل خارجی در مقاطع انتهایی قوس است که این موضوع در پروفیل عرضی<sup>۸</sup> بستر (شکل ۳-ب) و پروفیل طولی<sup>۹</sup> بستر (شکل ۴-ب) نیز مشخص است.

بررسی پروفیل مؤلفه طولی سرعت در مقاطع مختلف، بیانگر این است که اگر عرض کانال به سه قسمت تقسیم شود، از ابتدای قوس تا مقطع ۶۰ درجه، فقط در ثلث میانی هر مقطع پروفیل طولی تقریباً به پروفیل لگاریتمی نزدیک است.



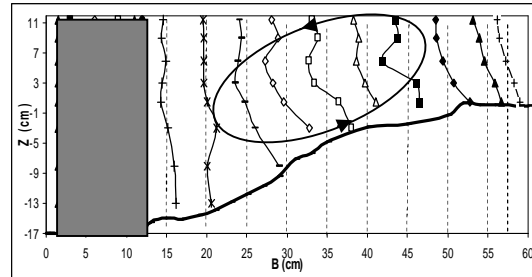
(الف)



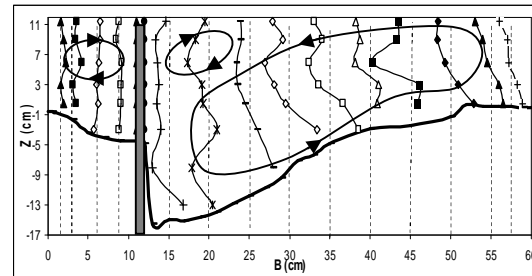
(ب)

شکل ۹: نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه طولی سرعت در دو مقطع بالادست آبشکن (الف) ۶۵ و (ب) ۷۴/۵ درجه.

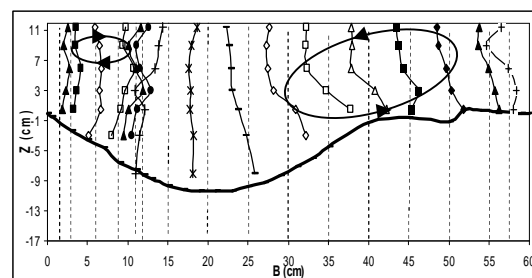
در شکل (۹-الف) برای نمونه پروفیل مؤلفه طولی سرعت در مقطع ۶۵ درجه نشان داده شده است. همچنین شکل (۹-ب) بیانگر پروفیل مؤلفه طولی سرعت در نزدیکی آبشکن است. همان طور که مشخص است، در لایه‌های میانی درون حفره آبشستگی، افزایش مؤلفه طولی سرعت به دلیل تمرکز تنش ناشی از دماغه آبشکن وجود دارد و این روند در نزدیکی شیب چاله آبشستگی نیز مشاهده می‌شود و دلیل حرکت رسوبات به سمت پایین‌دست است. شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) به ترتیب پروفیل مؤلفه طولی سرعت در پایین‌دست و نزدیک آبشکن و در انتهای قوس را نشان می‌دهد. در این شکل افزایش مؤلفه طولی سرعت در لایه‌های نزدیک بستر اولیه



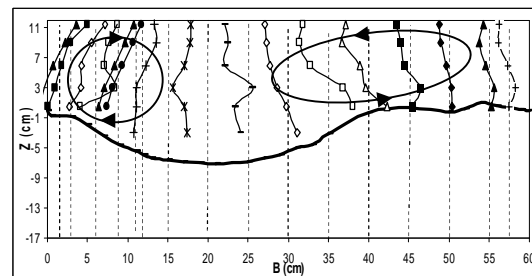
(الف)



(ب)



(ج)

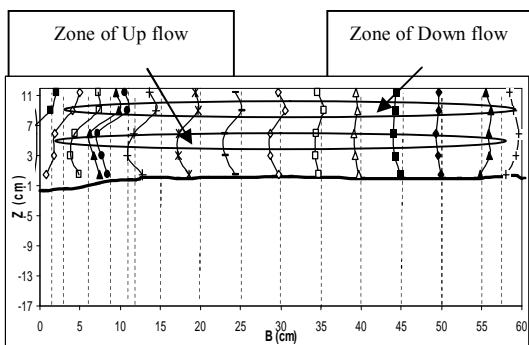


(د)

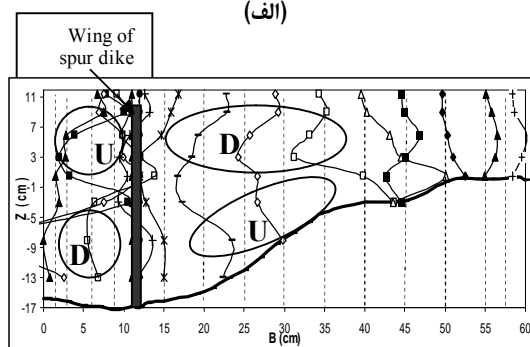
شکل ۸: نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه عرضی سرعت در مقاطع مختلف پایین دست آبشکن (الف) ۷۵ (ب) ۷۵/۵ (ج) ۷۷/۵ و (د) ۸۰ درجه.

در مقاطع پایین‌دست آبشکن همان طور که در شکل‌های (۸-ج) و (۸-د) مشاهده می‌شود، جریان ثانویه دوم در خلاف جهت جریان ثانویه اصلی شکل می‌گیرد. با پیشروی به سمت پایین‌دست قوس قدرت جریان ثانویه<sup>۱۰</sup> دوم افزایش می‌یابد و در انتهای قوس با غلبه بر جریان ثانویه اصلی، جهت جریان از ساحل خارجی به سمت

محدوده بین بال و ساحل خارجی در نزدیکی سطح بستر جریان رو به پایین و در نزدیکی سطح آب جریان رو به بالا حاکم است.

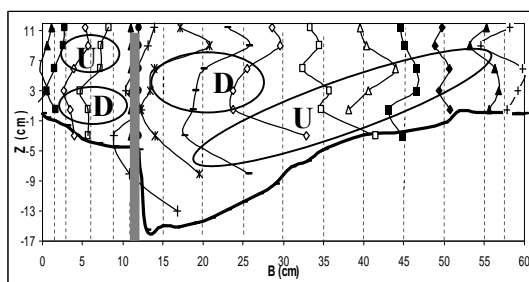


(الف)

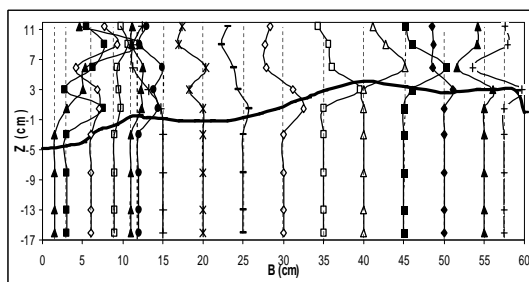


(ب)

شکل ۱۱: نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه عمقی سرعت در دو مقطع بالادست آبشکن (الف) ۶۵ و (ب) ۷۴/۵ درجه.



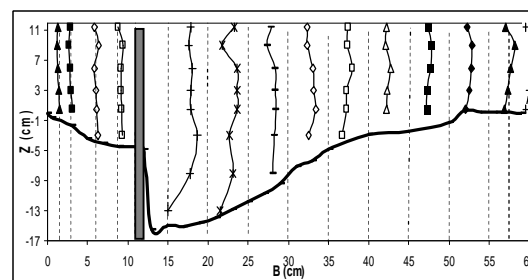
(الف)



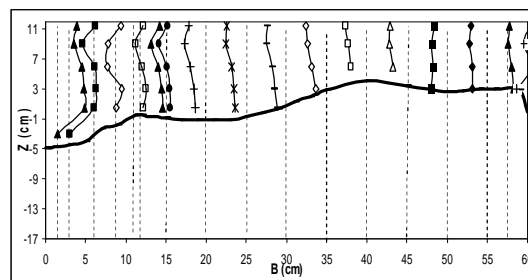
(ب)

شکل ۱۲: نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه عمقی سرعت در دو مقطع پایین دست آبشکن (الف) ۷۵/۵ و (ب) ۹۰ درجه.

قابل تشخیص است.



(الف)



(ب)

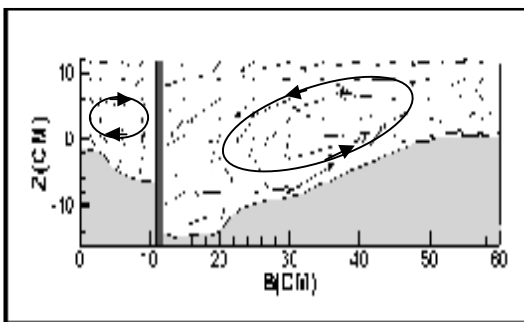
شکل ۱۰: نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه طولی سرعت در دو مقطع پایین دست آبشکن (الف) ۷۵/۵ و (ب) ۹۰ درجه.

همچنین شکل (۱۱) نمونه‌ای از پروفیل مؤلفه عمقی سرعت را نشان می‌دهد. از ابتدای قوس تا مقطع ۶۰ درجه در پروفیل عمقی سرعت به غیر از کناره کانال تغییر مشخصی دیده نمی‌شود، اما در مقطع ۶۰ درجه، همان‌طور که در شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است، دو ناحیه جریان رو به بالا<sup>۱۱</sup> و جریان رو به پایین<sup>۱۲</sup> مشخص است. این تغییرات با نزدیک شدن به موقعیت آبشکن محسوس‌تر است که دلیل آن وجود آبشکن و حفره آبشستگی و تأثیر آن در تغییر الگوی جریانات حاکم بر قوس است. شکل (۱۱-ب) پروفیل مؤلفه عمقی سرعت در نزدیکی بالادست آبشکن را نشان می‌دهد. در این شکل جریان‌های رو به بالا با حرف U و جریان رو به پایین به حرف D نشان داده شده است. در ناحیه بین بال آبشکن و ساحل خارجی، جریان در لایه‌های نزدیک بستر به شکل رو به پایین بوده که در نزدیکی بستر باعث جدایی ذرات رسوب از بستر می‌شود و در لایه‌های نزدیک سطح آب، به دلیل فشار کمتر در سطح، جریان به شکل رو به بالا است. شکل (۱۲) پروفیل مؤلفه عمقی سرعت را در پایین دست آبشکن نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۲-الف) مشخص است، در نزدیکی جان آبشکن و در

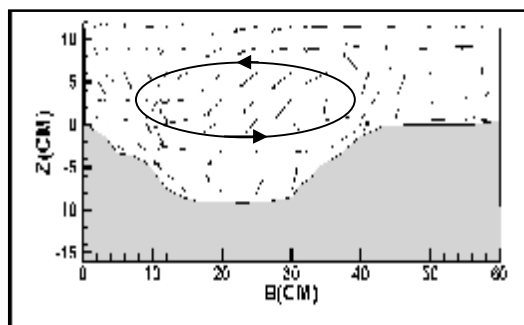


ساحل خارجی، یک گردابه افقی در جهت عقربه‌های ساعت شکل می‌گیرد. بررسی پروفیل‌های عرضی شکل (۸-ب) نشان از تشکیل این گردابه می‌دهد. همچنین یک گردابه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در محدوده بین بال و ساحل خارجی شکل می‌گیرد و این گردابه در مقطع بعدی نیز مشخص است.

شکل (۱۵) نمونه‌ای از بردارهای سرعت در چند تراز مختلف را نشان می‌دهد. شکل (۱۵-الف) و (۱۵-ب) مربوط به ترازهای داخل حفره آبستگ است و بیانگر وجود گردابه‌های افقی با جهت خلاف عقربه‌های ساعت و نزدیکی آبستگ است. در پایین دست آبشکن و نزدیکی ساحل خارجی نیز به دلیل آبستگ ناچیز بردارهای سرعت وجود ندارد. شکل (۱۵-ج) و (۱۵-د) نیز دو تراز بالاتر از بستر اولیه (۵ و ۱۱۵ میلی‌متری از بستر اولیه) را نشان می‌دهد. در ترازهای مختلف از سطح بستر اولیه به سمت سطح جریان، ابعاد گردابه بالادست بزرگ‌تر می‌شود که دلیل آن خارج شدن از داخل چاله آبستگ و آزادی عمل بیشتر جریان است. البته در نزدیکی سطح جریان به دلیل افزایش مؤلفه طولی سرعت گردابه<sup>۱۴</sup> ایجاد شده ابعاد کوچک‌تری دارد.

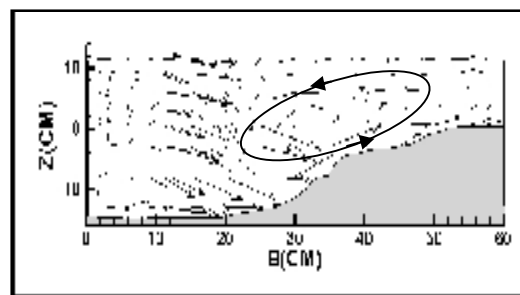


(الف)

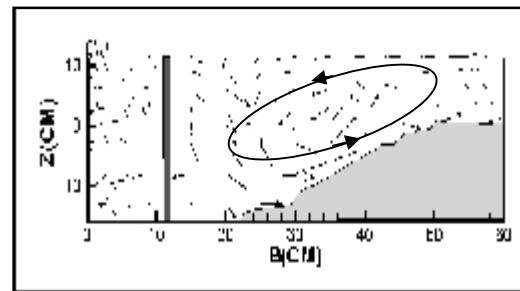


شکل ۱۴ : نمونه‌ای از بردارهای سرعت در دو مقطع پایین دست آبشکن (الف) ۷۵/۵ و (ب) ۷۷/۵ درجه.

دلیل وقوع این دو دسته جریان، شکل‌گیری جریان‌های بازگشتی در پایین دست آبشکن و به سمت جان آبشکن است. جریان بازگشتی در لایه‌های میانی مشاهده شده و در نزدیکی آبشکن به دلیل تمایل به سمت نواحی با فشار کمتر به دو قسمت تقسیم می‌شود. همچنین در ناحیه بین بال آبشکن و ساحل داخلی در نزدیکی بستر، جریان رو به بالا و در نزدیکی بال، جریان رو به پایین مشاهده می‌شود. این دو ناحیه به ترتیب عاملی در جهت خروج رسوبات از بستر و همچنین در جهت آبستگی اطراف بال است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳ : نمونه‌ای از بردارهای سرعت در دو مقطع بالادست آبشکن (الف) ۷۳/۲۵ و (ب) ۷۴/۵ درجه.

شکل (۱۳) نمونه‌ای از بردارهای سرعت<sup>۱۳</sup> در دو مقطع جلو بال (شکل (۱۳-الف)) و نزدیک جان آبشکن (شکل (۱۳-ب)) و در بالادست را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود یک گردابه اصلی در نزدیکی مرکز کانال قابل تشخیص است. این گردابه بیانگر جریان ثانویه اصلی است که به دلیل وجود آبشکن در فاصله بال آبشکن تا ساحل داخلی تشکیل می‌شود. شکل (۱۴) بردارهای سرعت در مقاطع عرضی نزدیک جان (شکل (۱۴-الف)) و جلو بال آبشکن (شکل (۱۴-ب)) در پایین دست را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۱۴-الف) مشخص است، در محدوده بین بال آبشکن و

### نتیجه گیری

در این مقاله بررسی الگوی جریان و آبستگي پیرامون آبشکن T شکل منفرد انجام و نتایج زیر حاصل شد:

- در یک ساعت اول آزمایش بیش از ۵۰ درصد آبستگي بیشینه شکل می گیرد.

- در طول بستر و در پایین دست آبشکن، علاوه بر چاله آبستگي<sup>۱۵</sup> پیرامون آبشکن، چاله آبستگي دومی نیز تشکیل می شود.

- هندسه آبشکن T شکل، باعث کاهش آبستگي در پایین دست آبشکن نسبت به بالادست آن می شود.

- در مقطع ۶۵ درجه، شروع شکل گیری حفره آبستگي بوده و جریان ثانویه دوم قدرت کمتری دارد.

- از ابتدای قوس<sup>۱۶</sup> و تا مقطع<sup>۱۷</sup> ۶۰ درجه در ثلث میانی هر مقطع پروفیل طولی تقریباً با به پروفیل لگاریتمی نزدیک است.

- محل آبستگي بیشینه در نزدیکی دیواره داخلی بال بالادست و به فاصله معادل ۱۵ درصد طول آبشکن از دماغه بال است.

- در مقطع ۳۰ درجه، جریان ثانویه دومی در خلاف جهت جریان ثانویه اول شکل می گیرد.

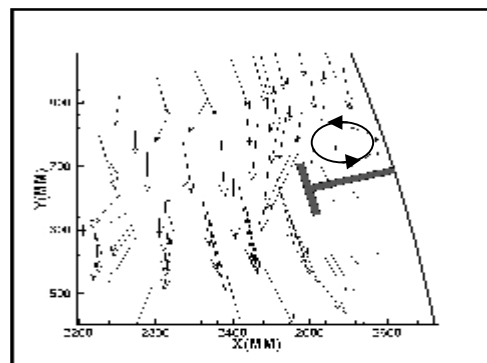
- با پیشروی به سمت پایین دست قوس قدرت جریان ثانویه دوم افزایش می یابد و در انتهای قوس با غلبه بر جریان ثانویه اصلی، باعث تغییر جهت جریان از ساحل خارجی به سمت ساحل داخلی می شود.

- جریان ثانویه اصلی در ناحیه بین دیواره بال و ساحل داخلی، در جهت گسترش شیب حفره آبستگي تشکیل می شود.

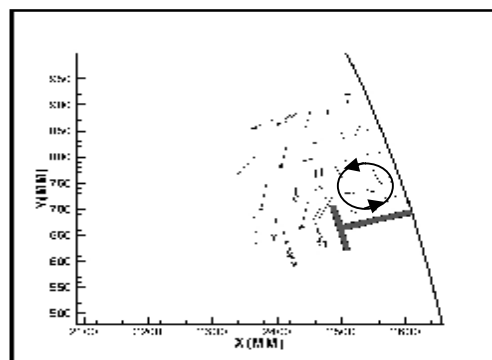
- گردابه های افقی با جهت خلاف عقربه های ساعت و در بالادست آبشکن در لایه های مختلف مشاهده می شود.

- آبشکن باعث انحراف مسیر سرعت بیشینه به سمت ساحل داخلی می شود.

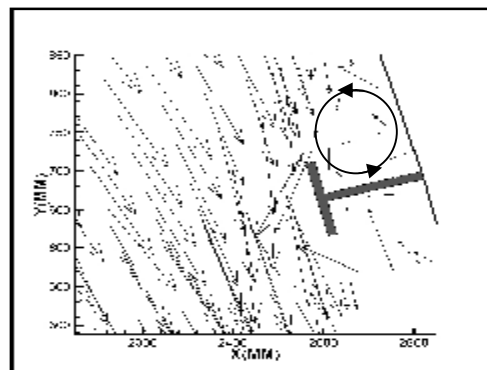
- در داخل محدوده بین بال بالادست و ساحل خارجی، دو گردابه با جهت مخالف هم شکل می گیرد.



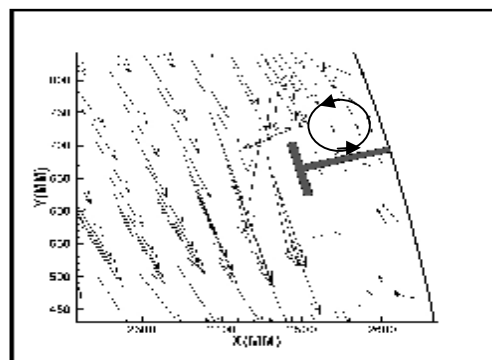
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۵: نمونه ای از بردارهای سرعت در ترازهای (الف) ۱۳۰ - (ب) ۳۰ - (ج) ۵ و (د) ۱۱۵ میلی متری از بستر اولیه.

## مراجع

- 1 - Ahmed, F. and Rajaratnam, N. (2000). "Observations on flow around bridge abutment." *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No.1, PP. 51–59.
- 2 - Dey, S. (1995). "Three-dimensional vortex flow field around a circular cylinder in a quasi-equilibrium scour hole." *Proceedings of Indian Academic of Sciences. Sadhana*, Vol. 20, No.6, PP. 771–785.
- 3 - Barbhuiya, A.K. and Dey, S. (2004). "Turbulent flow measurement by the ADV in the vicinity of a rectangular cross-section cylinder placed at a channel sidewall." *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol. 15, No.4, PP. 221–237.
- 4 - Dey, S. and Barbhuiya, A.K. (2005). "Turbulent flow field in a scour hole at a semicircular abutment." *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 32, No.1, P. 213–232.
- 5 - Dey, S. and Barbhuiya, A.K. (2006) "Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical-wall abutment." *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol.17, PP. 13-21
- 6 - Forghani, M., J., Fazli, M. and Ghodsian, M. (2007). "Experimental study on flow field and scouring around a spur dike in ninety degree bend." *32 nd Congress of IAHR, Venice, Italy*.
- 7 - 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*. Vol. 15, PP. 301-309.
- 8 - Ghodsian M., and Vaghefi M. (2009). "Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T shaped spur dike in a 90° bend." *International Journal of Sediment Research*. Vol.24, No.2, PP 145-158.
- 9 - Graf, W.H. and Istiarto, I (2002). "Flow pattern in the scour hole around cylinder." *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 40, No.1, PP. 13–20.
- 10 - Melville, B.W and Raudkivi, R.J. (1977). "Flow characteristics in local scour at bridge piers." *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 15, No.4, PP. 373–380.
- 11 - Rajaratnam, N. and Nwachukwu, B.A. (1983) "Flow near groin-like structures." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. Vol. 109, No.3, PP. 463–480.
- 12 - Salajeghe, M. (2003). *Experimental study of flow pattern around spur dike in 180 degree bend with rigid bed*. Tehran University, Iran, P.H.D Thesis.
- 13 - Tingsanchali, T. and Maheswaran, S. (1990). "2-D Depth-Averaged Flow computation Near Groin." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 116, No.1, PP.71-86.
- 14 - Vaghefi, M., Ghodsian, M and salehi Neyshabori, S.A. (2009). "Experimental Study on Scour around Single T Shaped Spur Dike Located in a 90o bend" *Iran Water Resources Research Journal*, Vol. 4, no. 3, 57-69.
- 15 - Vaghefi, M., Ghodsian, M and salehi Neyshabori, S.A. (2008). "Experimental Study the Effect of Wing Geometry on Scour around T Shaped Spur Dike Located in a 90o bend." *7th National Conferences of Iranian Hydraulic*, Industrial Water and Power University, Tehran, Iran.
- 16 - Vaghefi, M., Ghodsian, M and salehi Neyshabori, S.A. (2008). "Experimental Study the Effect of Froude Number on Scour Pattern around T Shaped Spur Dike Located in a 90o bend." *7th National Conferences of Iranian Hydraulic*, Industrial Water and Power University, Tehran, Iran.

---

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Spur Dike
- 2 - Flow Pattern
- 3 - Scour Pattern
- 4 - Acoustic Doppler Velocimeter
- 5 - Sidelooking
- 6 - Downlooking
- 7 - Maximum Scour
- 8- Lateral profile
- 9 - Longitudinal Profile
- 10 - Secondary Flow
- 11 - Up Flow
- 12 - Down Flow
- 13 - Vector Velocity
- 14 - Vortex
- 15 - Scour Hole
- 16 - Bend
- 17 - Section