



دانشگاه گلستان، مشهد

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد شانزدهم، شماره دوم، ۱۳۸۸  
www.gau.ac.ir/journals

## مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه‌بعدی پیرامون آب‌شکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه

\* محمد واقفی<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲</sup> و سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، <sup>۲</sup> استاد پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
تاریخ دریافت: ۸۷/۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۶/۳

### چکیده

در این پژوهش به اندازه‌گیری آزمایشگاهی میدان جریان پیرامون قوس ۹۰ درجه و قوس توأم با آب‌شکن T شکل مستقر در زاویه ۷۵ درجه پرداخته شده است. آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی با شعاع انحنای ملایم انجام گرفت. در اندازه‌گیری میدان جریان از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV استفاده گردید. برای این منظور الگوی سه‌بعدی متوسط زمانی سرعت در قوس ۹۰ درجه بدون آب‌شکن و قوس توأم با آب‌شکن برداشت شد. در قوس توأم با آب‌شکن نیز دو حالت بستر صلب و بستر با چاله آب‌شستگی تعادل‌یافته جهت تشخیص تفاوت الگوی جریان در ابتدای آزمایش و پس از زمان تعادل آزمایش شد. مقایسه بین مقاطع مختلف طولی، عرضی و افقی در سه آزمایش ذکر شده، انجام و تفاوت الگوی جریان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. گردابه‌ها و جریان‌های بازگشتی موجود در بالادست و پایین دست آب‌شکن و تغییرات به وجود آمده در جریان ثانویه از نکات مطرح شده در این مقاله می‌باشد. نتایج نشان داد که جریان‌های بازگشتی در بالادست و پایین دست آب‌شکن با بستر صلب و تعادل‌یافته شکل می‌گیرد و این جریان‌ها در پایین دست تا فاصله بیشتری از ساحل خارجی نسبت به بالادست تشکیل می‌شود. همچنین شروع جریان بازگشتی در پایین دست آب‌شکن در آب‌شکن با بستر صلب از ۸ برابر طول آب‌شکن و برای بستر تعادل‌یافته از ۳ برابر طول آب‌شکن دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان سه‌بعدی، آب‌شکن T شکل، جریان ثانویه

\* مسئول مکاتبه: vaghefi@pgu.ac.ir

## مقدمه

مسیر رودخانه‌ها در طبیعت توأم با قوس‌ها و پیچان‌رودها می‌باشد. معمولاً قسمت‌های دارای انحنا در رودخانه از جمله بازه‌های بحرانی در شناسایی رفتار هیدرولیکی رودخانه می‌باشد. طبیعت سه‌بعدی جریان و آشفتگی‌های موجود در قوس‌ها از یک‌طرف 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 جریان در قوس رودخانه نیروهای گریز از مرکز می‌باشد. در رودخانه‌ها به خاطر وجود تنش برشی در بستر و عدم وجود آن در سطح آزاد، سرعت جریان در نواحی بالایی نزدیک سطح آزاد زیاد بوده 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 ساحل خارجی رانده شد و در قسمت پایین به سمت قوس داخلی حرکت می‌کند. در اثر اندرکنش بین جریان‌های ثانویه و یکنواخت نبودن پروفیل سرعت غیریکنواخت در عمق الگوی جریانی به نام جریان حلزونی تشکیل می‌شود 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 استفاده از آب‌شکن می‌باشد هنگامی که از آب‌شکن‌ها برای محافظت جداره رودخانه در خم‌ها و یا برای اهدافی دیگر مانند حفظ الگوی جریان استفاده می‌شود، تحلیل جریان و آب‌شستگی 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 این بین پی بردن به هیدرودینامیک جریان می‌تواند از لحاظ کاربردی اهمیت بسیاری داشته که از آن جمله می‌توان به پدیده‌هایی مانند جلوگیری از رسوب‌گذاری، محافظت جداره رودخانه‌ها، جلوگیری از فرسایش بستر، کنترل پشته‌های رسوبی ایجاد شده در قوس و تثبیت توپوگرافی بستر پیرامون آب‌شکن اشاره نمود. در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه‌بعدی در قوس ۹۰ درجه و قوس ۹۰ درجه توأم با آب‌شکن T شکل پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا در مقاطع و پلان‌های مختلف قوس تنها و بدون آب‌شکن برداشت سرعت سه‌بعدی انجام

گرفت و سپس با استقرار آب‌شکن در موقعیت ۷۵ درجه برای دو حالت بستر ثابت و بستر با چاله آب‌شستگی تعادل‌یافته الگوی جریان در مقاطع و پلان‌های مختلف و با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی<sup>۱</sup> ADV اندازه‌گیری گردید.

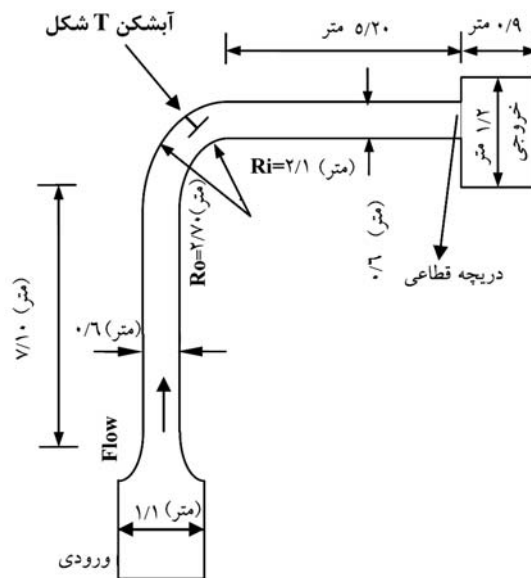
هر چند در مورد الگوی جریان در قوس و کانال‌های قوسی تحقیقات زیادی انجام گرفته ولی در مورد اندازه‌گیری جریان پیرامون سازه‌های هیدرولیکی مستقر در رودخانه‌ها مانند آب‌شکن و تکیه‌گاه پل مطالعات انجام گرفته محدود بوده و این مطالعات نیز بیشتر در مسیرهای مستقیم می‌باشد. ملویل و رادکیوی (۱۹۷۷) به مطالعه خصوصیات جریان در حفره آب‌شستگی موضعی اطراف پایه پل مستقر در مسیر مستقیم پرداخت. راجاراتنام و ناواچوکوا (۱۹۸۳) رفتار جریان در اطراف سازه‌هایی شبیه به آب‌شکن و مستقر در مسیر مستقیم را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. تینگسانچالی و ماهاسواران (۱۹۹۰) از یک مدل آشفتگی k-ε دوبعدی (2D) متوسط‌گیری شده در عمق که برای اثر انحناء خط جریان اصلاح شده بود برای حل معادلات حاکم در نزدیکی آب‌شکن استفاده کردند. دی (۱۹۹۵) و گراف و استیارتو (۲۰۰۲) میدان جریان سه‌بعدی و نقش گردابه‌ها در تشکیل حفره آب‌شستگی اطراف پایه‌های استوانه‌ای را بررسی کردند. احمد و راجاراتنام (۲۰۰۰) خصوصیات جریان اطراف تکیه‌گاه پل‌ها در مسیرهای مستقیم را بررسی نمودند. سلاجقه (۲۰۰۳) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان دوبعدی در اطراف آب‌شکن‌های مستقر در قوس ۱۸۰ درجه و با بستر صلب پرداخت. گیری و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی آزمایشگاهی و عددی شبیه‌سازی جریان و آشفتگی در فلومی شبیه به رودخانه‌های مئاندری با وجود آب‌شکن‌های غیرمستغرق پرداختند. آنها با استفاده از (ADV) به اندازه‌گیری سرعت با تغییر دادن موقعیت آب‌شکن‌ها پرداخته و تأثیر آن را بر روی میدان جریان اطراف آب‌شکن مورد نظر قرار دادند. همچنین میدان گردابه‌ها و شدت آشفتگی را با تکنیک درون‌یابی درجه سوم شبه ذره (CIP) و به‌صورت دوبعدی اندازه‌گیری نمودند. بارباحیوا و دی (۲۰۰۴) دی و بارباحیوا، ۲۰۰۵؛ دی و بارباحیوا، ۲۰۰۶) به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه‌بعدی، تعیین تنش‌های رینولدزی، میزان آشفتگی و میدان جریان آشفته در اطراف تکیه‌گاه پل با مقطع نیم‌دایره، مستطیلی و دوزنقه‌ای در مسیر مستقیم پرداختند. فرقانی و همکاران (۲۰۰۷) به اندازه‌گیری

1- Acoustic Doppler Velocimeter

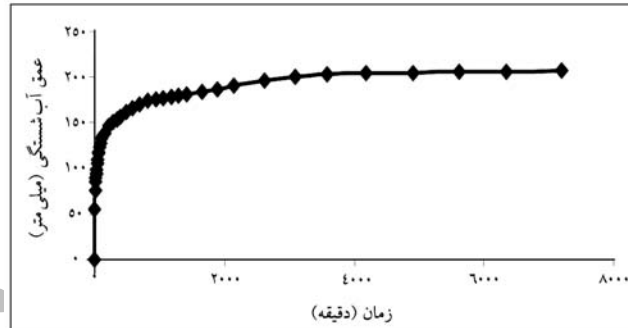
آزمایشگاهی دوبعدی سرعت پیرامون آب‌شکن‌های منفرد مستقر در قوس ۹۰ درجه پرداخت. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشتر مطالعه‌های انجام گرفته در زمینه الگوی جریان پیرامون سازه‌های هیدرولیکی مستقر در رودخانه‌ها در مسیر مستقیم بوده است و در قوس نیز یا با بستر صلب تحقیق انجام گرفته و یا الگوی جریان دوبعدی می‌باشد. در این پژوهش علاوه بر این که جریان به صورت سه‌بعدی اندازه‌گیری شده، به‌کارگیری آب‌شکن T شکل در قوس ۹۰ درجه نیز از نوآوری‌های پژوهش می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مورد نظر در کانالی با قوس ۹۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام گرفت. شکل (۱) پلان و هندسه قوس مورد نظر را نشان می‌دهد. این کانال از یک قسمت مستقیم به‌طور ۷/۱ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۵/۲ متر در پایین‌دست تشکیل می‌شود که این دو مسیر مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای خارجی ۲/۷ متر به یکدیگر متصل شده است. کانال از جنس شیشه ساخته شده که توسط قاب‌های فولادی پایداری آن حفظ می‌شوند. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر ۴، ارتفاع آن ۷۰ سانتی‌متر 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 به‌وسیله یک ارفیس کالیبره شده تنظیم گردید. همچنین عمق جریان با استفاده از یک عمق‌سنج الکترونیکی با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای کنترل جریان از یک دریچه قطاعی که در انتهای کانال نصب گردیده استفاده شد. آب‌شکن به صورت صفحات مستطیلی با پلان T شکل و از جنس پلکسی‌گلاس می‌باشد. ضخامت آب‌شکن ۱ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آب‌شکن در زاویه ۷۵ درجه که بیشترین میزان آب‌شستگی در قوس را دارد، مستقر گردید.



شکل ۱- کانال آزمایشگاهی.



شکل ۲- تغییرات زمانی عمق آبشستگی در آزمایش زمان تعادل.

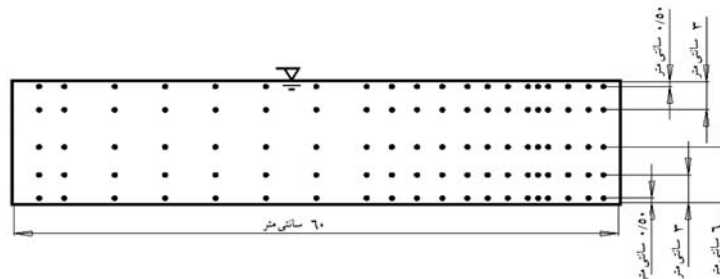
دبی جریان در کلیه آزمایش‌ها ثابت و برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد. آزمایش‌ها در سه بخش با هدف برداشت الگوی جریان: الف) در قوس بدون آبشکن با بستر متحرک، ب) در قوس با آبشکن با بستر صلب و ج) در قوس با آبشکن با بستر تعادل یافته انجام گرفته است. در تمام آزمایش‌ها شرایط آب تمیز حاکم بود. برای در نظر گرفتن زمان تعادل، آزمایش ۱۲۰ ساعته انجام شد که در پایان این زمان، آبشستگی در فواصل ۴ ساعته از ۱ میلی‌متر کمتر بود. زمان مربوط به ۰/۸۸ آبشستگی

حداکثر که معادل ۲۴ ساعت می‌باشد به‌عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد. در شکل (۲) نمودار زمان تعادل ارایه گردیده است. در آزمایش با بستر صلب سراسر قوس به‌وسیله یک صفحه فلزی بر روی رسوبات کف کانال پوشیده شد. به‌منظور 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 در بستر آب‌شستگی مشاهده نمی‌شود. در آزمایش با بستر تعادل‌یافته ابتدا در مدت زمان تعادل که ۲۴ ساعت بود آب‌شستگی اطراف آب‌شکن و تغییرات توپوگرافی قوس به تعادل رسید و سپس در مدت زمان ۱۲ ساعت بستر خشک شد. پس از خشک شدن بستر، چسب مخصوصی بر روی بستر تعادل‌یافته پاشیده شد. بعد از گذشت زمان ۱۲ ساعت بستر خشک گردید. مدت زمان اشباع کانال بین ۲۰ تا ۳۰ دقیقه می‌باشد. به‌منظور حفظ بستر در شروع آزمایش، آب توسط لوله از بالادست و پایین‌دست کانال جاری می‌شد. در طی این مدت یک دریاچه کشویی در جلو دریاچه قطاعی کانال قرار می‌گرفت که وظیفه آن جلوگیری از خروج آب از کانال بود. پس از بالا آمدن سطح آب در کانال، به‌صورت تدریجی جریان به دبی مورد نظر افزایش یافت. سپس دریاچه کشویی به‌صورت تدریجی از جلو مسیر جریان خارج و مقدار جریان در طول آزمایش توسط ارفیس نصب شده در کنار کانال تنظیم می‌شد. در انتهای آزمایش نیز با خاموش کردن پمپ، دبی جریان به‌صورت تدریجی از کانال خارج و زه‌کشی کانال در مدت زمان ۲ تا ۳ ساعت انجام گرفت. برداشت پروفیل سرعت سه‌بعدی در قوس توأم با آب‌شکن و با بستر متحرک در ۲۳ مقطع عرضی در طول قوس و ۸ پلان افقی انجام گرفت که ۳ پلان در داخل چاله آب‌شستگی بود و در قوس توأم با بستر صلب و قوس بدون آب‌شکن تنها در ۵ پلان افقی اندازه‌گیری شده است. همچنین در هر محور عرضی ۲۰ نقطه قرائت شده است. شبکه‌بندی ذکر شده غیریکنواخت بوده و در نزدیکی آب‌شکن ریزتر می‌باشد. در شکل (۳) نمونه‌ای از پروفیل عرضی بستر در قوس توأم با آب‌شکن با بستر صلب ارایه شده است. در اندازه‌گیری سرعت از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV استفاده شد. از مشخصات این دستگاه اندازه‌گیری جریان در فاصله ۵ سانتی‌متری نوک حس‌گر آن می‌باشد. به همین دلیل در اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی سطح جریان از حس‌گر جانب‌نگر<sup>۱</sup> در لایه‌های دیگر از حس‌گر پایین‌نگر<sup>۲</sup> استفاده شده است. دستگاه سرعت‌سنج روی فرکانس ۵۰ هرتز

1- Side Looking

2- Down Looking

تنظیم شد 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 بوده که این داده‌ها توسط نرم‌افزارهای جانبی وکتورینو<sup>۱</sup> و اکسپلورر وی<sup>۲</sup> متوسط‌گیری شده و بررسی الگوی جریان توسط متوسط‌های ارایه شده انجام گردید. در نقاط نزدیک آب‌شکن و به‌منظور قرائت سرعت جریان در اطراف بال و جان آب‌شکن، نمونه‌گیر سرعت در جهت‌های مختلف قرار داده شد. همچنین سرعت‌های برداشت شده در طول قوس ۹۰ درجه از مختصات قطبی به مختصات دکارتی تبدیل گردید. مشاهدات کیفی (تزریق مواد رنگی، حرکت نوارهای رنگی و تزریق براده چوب) به‌منظور مشاهده الگوی جریان در کلیه آزمایش‌ها انجام شد.

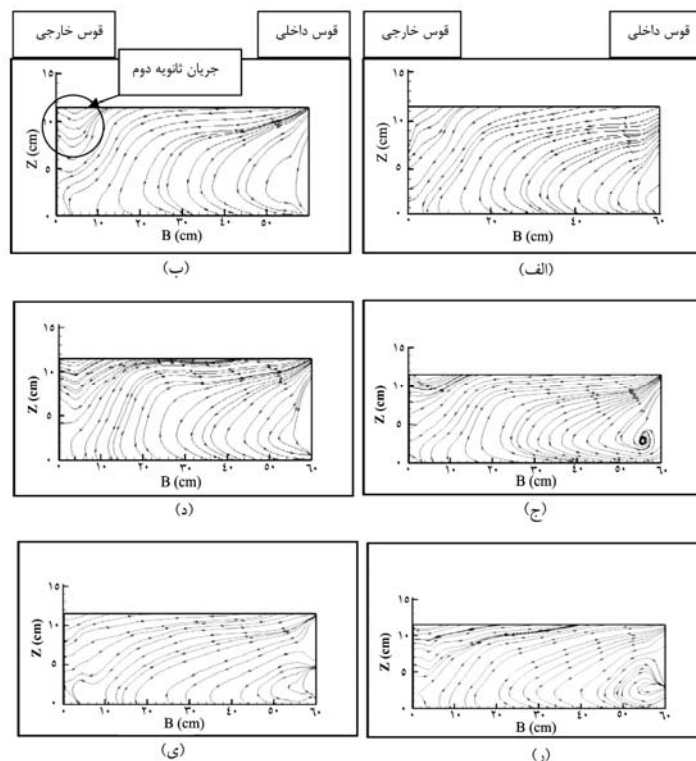


شکل ۳- نمونه‌ای از پروفیل عرضی نقاط برداشت شده در قوس توأم با آب‌شکن با بستر صلب.

## نتایج

الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه و بدون حضور آب‌شکن: مشاهدات الگوی جریان مربوط به قوس تنها، بیانگر وجود جریان‌های ثانویه در مقاطع مختلف می‌باشد. در شکل (۴) برای نمونه، الگوی جریان در مقاطع مختلف از قوس ۹۰ درجه نشان داده شده است.

1- Vecterino  
2- Explorer v

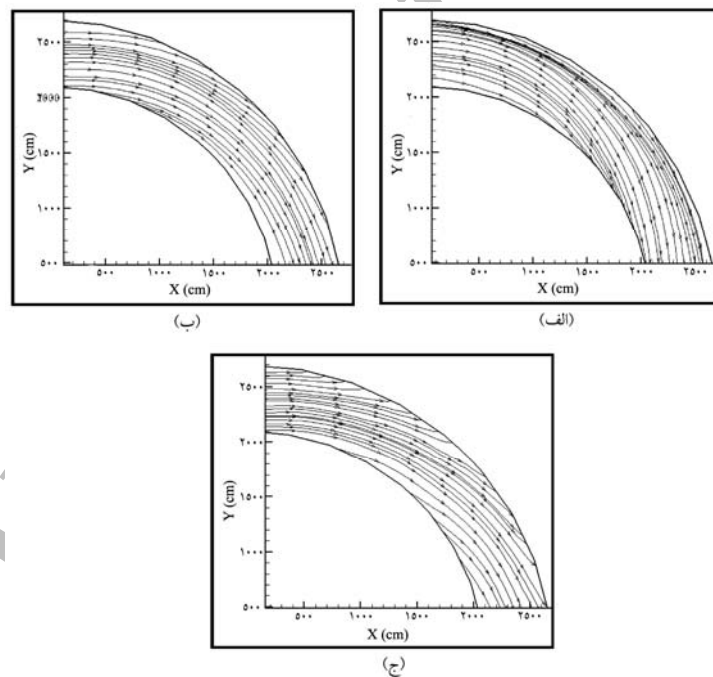


شکل ۴- نمایش الگوی جریان در مقاطع مختلف عرضی قوس ۹۰ درجه (الف) ۳۰، (ب) ۵۰، (ج) ۶۰، (د) ۷۰، (ر) ۸۰ و (ی) ۹۰ درجه.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود خطوط جریان در کلیه مقاطع در سطح آب به سمت قوس خارجی و در بستر به سمت داخلی می‌باشد. علت آنرا چنین می‌توان بیان کرد که با ورود جریان به قوس، نیروی گریز از مرکز بر جریان اثر کرده و باعث اختلاف رقوم سطح آب بین ساحل خارجی و داخلی می‌شود. در اثر این پدیده، اختلاف فشار بین دو سمت قوس ایجاد می‌گردد. در اثر اندرکنش بین نیروی گریز از مرکز و اختلاف فشار نتیجه شده از اختلاف سطح آب و مقاومت برشی بستر، جریان ثانویه در مقاطع عمود بر مسیر آب و همچنین جریان ثانویه دوم در مقطع ۴۵ درجه در خلاف جهت جریان ثانویه اول به وجود می‌آید. علت تشکیل جریان ثانویه دوم این است که با ورود جریان به قوس در اثر عملکرد قوس و نیروی جانب مرکز، جریان سطحی به سمت قوس خارجی رانده می‌شود و بعد از برخورد به دیواره قوس خارجی به سکون رسیده و سطح آب بالا می‌افتد.



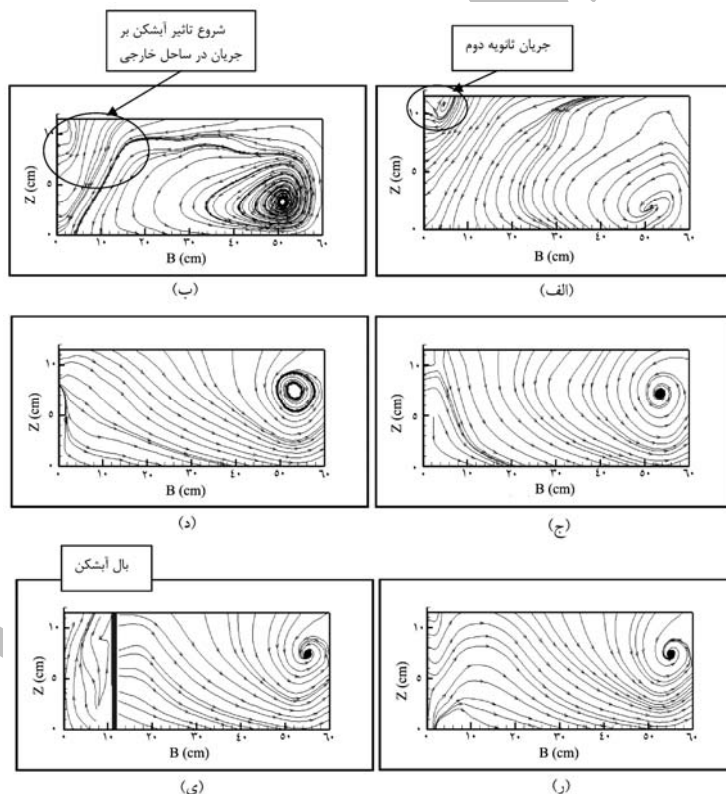
نیروی ناشی از وزن این ستون بالاافتادگی آب می‌تواند یک نیروی به طرف پایین در راستای مرز تقاطع آب ساکن با چرخه اصلی جریان ثانویه مرکزی، ایجاد نماید و به همین دلیل یک جریان ثانویه دوم در نزدیکی قوس خارجی شکل می‌گیرد. در شکل (۴- ب و ج) این جریان در نزدیکی قوس خارجی و در لایه‌های بالایی مشهود است و تا زاویه حدود ۷۰ درجه، جریان ثانویه دوم با میزان کمتر مشاهده می‌گردد. این جریان عاملی جهت کاهش آب‌شستگی در قوس خارجی ناشی از جریان ثانویه اصلی می‌باشد. علت این جریان وقوع جریان‌های رو به بالا در نزدیکی ساحل خارجی و در لایه‌های میانی تا لایه‌های سطح آب می‌باشد. لازم به ذکر است که بلانکارت و گراف در سال ۲۰۰۱ طی مطالعاتی که بر روی الگوی جریان در قوس ۱۲۰ درجه انجام دادند وقوع سلول چرخشی دوم را در زاویه ۶۰ درجه گزارش دادند. در مقاطع انتهایی قوس (شکل‌های ۴- د، ۴- ر و ۴- ی) جریان ثانویه دوم کاهش و در انتهای قوس ناپدید می‌گردد.



شکل ۵- نمایش الگوی جریان در پلان‌های مختلف قوس ۹۰ درجه (الف) ۵ میلی‌متری از کف، (ب) ۶۰ میلی‌متری از کف و (ج) ۱۱۵ میلی‌متری از کف.

شکل (۵) برای نمونه خطوط جریان در فاصله ۵ میلی متری از بستر اولیه، در فاصله میانی عمق جریان و در فاصله ۵ میلی متری از سطح جریان را نشان می دهد. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود جریان در نزدیک بستر به سمت قوس داخل می باشد. و با تغییر موقعیت به سمت سطح آب، خطوط جریان به سمت قوس خارجی متمایل می شود که این پدیده ناشی از ترکیب جریان ثانویه با جریان طولی و تشکیل جریان حلزونی می باشد.

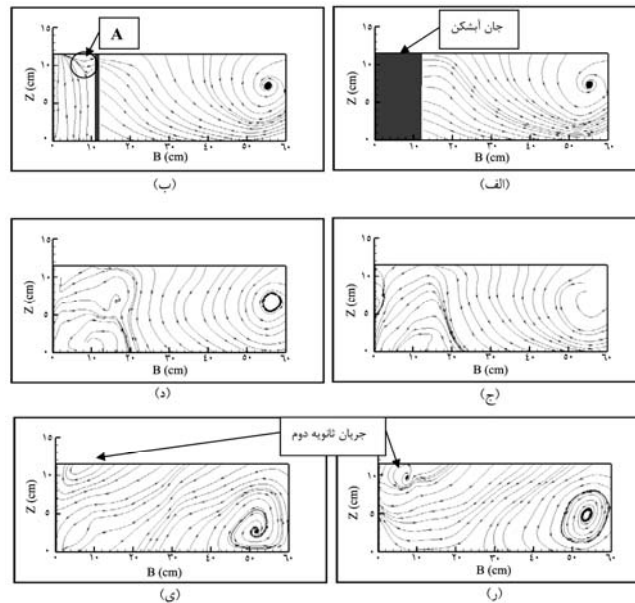
الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه تحت تأثیر آب شکن با بستر صلب: برداشت پروفیل سرعت در قوس توأم با آب شکن و با بستر صلب بیانگر الگوی جریان در ابتدای تشکیل پدیده فرسایش می باشد که تجزیه و تحلیل این قسمت می تواند در پیش بینی تغییرات بستر مؤثر باشد.



شکل ۶- نمایش نمونه ای از الگوی جریان در مقاطع مختلف عرضی و در بالادست قوس ۹۰ درجه با آب شکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر صلب (الف) ۳۰، (ب) ۶۰، (ج) ۶۵، (د) ۷۲/۵، (ر) ۷۳/۷۵ و (ی) ۷۴/۵ درجه.

در شکل (۶) نمونه‌ای از پروفیل‌های عرضی الگوی جریان در بالادست آب‌شکن مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مقاطع ابتدایی قوس جریان ثانویه شکل می‌گیرد و مشابه الگوی جریان در قوس بدون آب‌شکن می‌باشد و تأثیر وجود آب‌شکن در شکل‌گیری جریان ثانویه دوم در مقاطع ابتدایی بالادست نسبت به حالت قوس تنها است (شکل ۴). این پدیده از مقایسه شکل (۴-الف) و شکل (۶-الف) مشهود است. شکل (۶-ب) نیز بیانگر شروع تأثیر آب‌شکن بر روی جریان در مقطع ۶۰ درجه یعنی در حدود ۸ برابر طول آب‌شکن از بالادست آب‌شکن می‌باشد. از مقطع ۶۵ درجه به بعد جهت جریان در سطح آب و در ساحل خارجی به صورت جریان رو به پایین و به سمت ساحل داخلی می‌شود و با نزدیک شدن به محل آب‌شکن این پدیده بیشتر آشکار می‌شود. جریان رو به پایین ایجاد شده با برخورد به سطح بستر در شروع آزمایش باعث ایجاد چاله آب‌شستگی و گسترش آن در عرض و طول کانال می‌گردد و هرچه مقطع به آب‌شکن نزدیک‌تر می‌شود برخورد خطوط جریان به سطح بستر محدوده بیشتری از عرض کانال را شامل می‌شود. با برخورد خطوط جریان به سطح بستر جریان جهت رو به بالا پیدا کرده و به سمت ساحل داخلی و سطح آب متمایل می‌گردد. این مسأله باعث ایجاد گردابه‌ای افقی با محوری در راستای جریان اصلی می‌شود که نسبت به حالت قوس تنها از شدت بیشتری برخوردار بوده و در میانه عمق جریان ایجاد می‌شود (شکل ۴). شکل (۶-ر) نشان‌دهنده مقطع جلو بال آب‌شکن می‌باشد. در این مقطع وجود جریان‌های رو به بالا در فاصله ساحل خارجی تا بال آب‌شکن مشهود است. این امر نتیجه جریان‌های برگشتی ایجاد شده در داخل محدوده بین بال آب‌شکن و جان آب‌شکن می‌باشد. بعد از بال آب‌شکن و در عرض کانال نیز جریان تحت تأثیر جریان ثانویه، جهت رو به پایین و به سمت بستر کانال دارد، همچنین شکل‌های (۶-ج) و (۶-د) توسعه جریان ثانویه در مقاطع ۶۵ و ۷۲/۵ درجه را نشان می‌دهند. شکل (۶-ی) بیانگر مقطع عرضی نزدیک جان آب‌شکن می‌باشد. در این شکل جریان‌های رو به بالا در محدوده بین دیواره بال آب‌شکن و ساحل خارجی مشاهده می‌گردد. اندرکنش میان این جریان با جریان‌های طولی معکوس با جهتی در خلاف جریان اصلی، عامل اصلی در ایجاد چاله آب‌شستگی و خروج رسوبات جدا شده به وسیله جریان‌های رو به پایین به خارج از چاله آب‌شستگی پیرامون آب‌شکن می‌باشد.

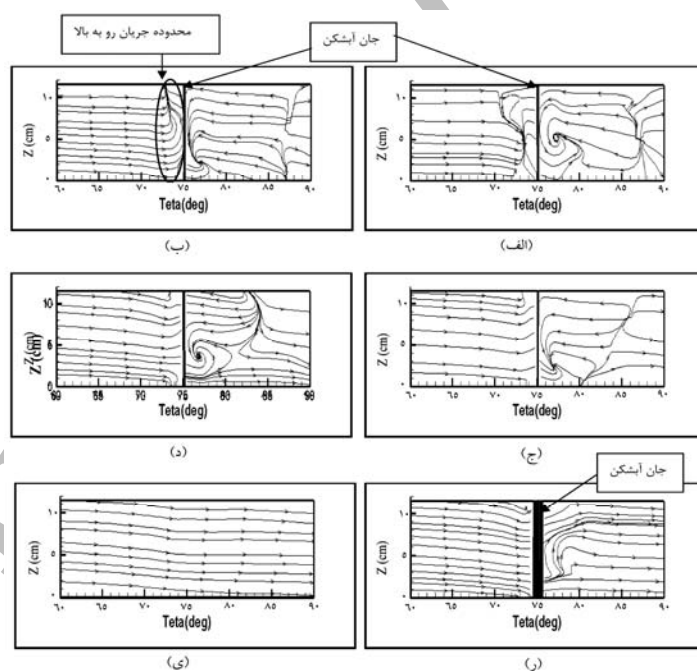
شکل (۷) نشان‌دهنده نمونه‌ای از پروفیل‌های عرضی در محور پایین‌دست آب‌شکن می‌باشد. در شکل (۷-الف) الگوی عرضی جریان در محل نصب آب‌شکن نشان داده شده و از دیواره بال آب‌شکن و به سمت ساحل داخلی، جریان رو به پایین مشخص می‌باشد. این جریان عاملی جهت ایجاد آب‌شستگی در شروع آزمایش و گسترش چاله آب‌شستگی به سمت ساحل داخلی می‌باشد. در شکل (۷-ب) خطوط جریان در مقطع عرضی پایین‌دست و نزدیک دیواره جان را نشان می‌دهد. جریان‌های رو به پایین در منطقه بین دیواره بال پایین‌دست و ساحل خارجی، جریان غالب می‌باشد. وقوع این جریان توأم با جریان‌های طولی با مقدار کم و در جهت خلاف جریان اصلی در این منطقه به کاهش تنش برشی و در نتیجه جلوگیری از آب‌شستگی کمک می‌کند. همچنین در نزدیکی دیواره داخلی بال و در لایه‌های سطحی، جهت جریان به سمت قوس داخل تغییر می‌کند. علت این پدیده تحت‌تأثیر قرار گرفتن جریان در این ناحیه از جریان‌های جهت اصلی و با سرعت زیاد در دماغه بال پایین‌دست می‌باشد. این ناحیه در شکل (۷-ب) با حرف A نشان داده شده است. شکل (۷-ج) و (۷-د) الگوی جریان در مقاطعی عرضی به فاصله در حدود یک تا دو برابر طول آب‌شکن را نشان می‌دهد. در این مقاطع جریان تا یک سوم عرض کانال تحت‌تأثیر حضور آب‌شکن می‌باشد و از آن به بعد الگوی جریان ثانویه حاکم است. همچنین تغییر مسیر جریان در دو سوم عرض کانال و به طرف قوس داخلی در شکل (۷-د) مشهود می‌باشد. شکل (۷-ر) و (۷-ی) نیز الگوی جریان عرضی در مقاطع انتهایی قوس را نشان می‌دهد. در این مقاطع، جریان ثانویه شبیه به الگوی جریان در مقاطع مشابه در قوس بدون آب‌شکن می‌باشد (شکل ۴). تفاوت این حالت با قوس بدون آب‌شکن تغییرات مشهود در گردابه‌های ایجاد شده در نزدیکی قوس داخلی می‌باشد که علت آن بازشدگی مقطع در پایین‌دست آب‌شکن و تمایل خطوط جریان موجود در کف بستر در حرکت رو به بالا می‌باشد. همچنین جریان ثانویه دوم در خلاف جهت جریان اصلی در نزدیکی قوس خارجی و در لایه‌های نزدیک سطح جریان شکل گرفته است که به دلیل وجود جریان‌های رو به بالا ناشی از فشار کمتر در سطح آب و در انتهای قوس می‌باشد.



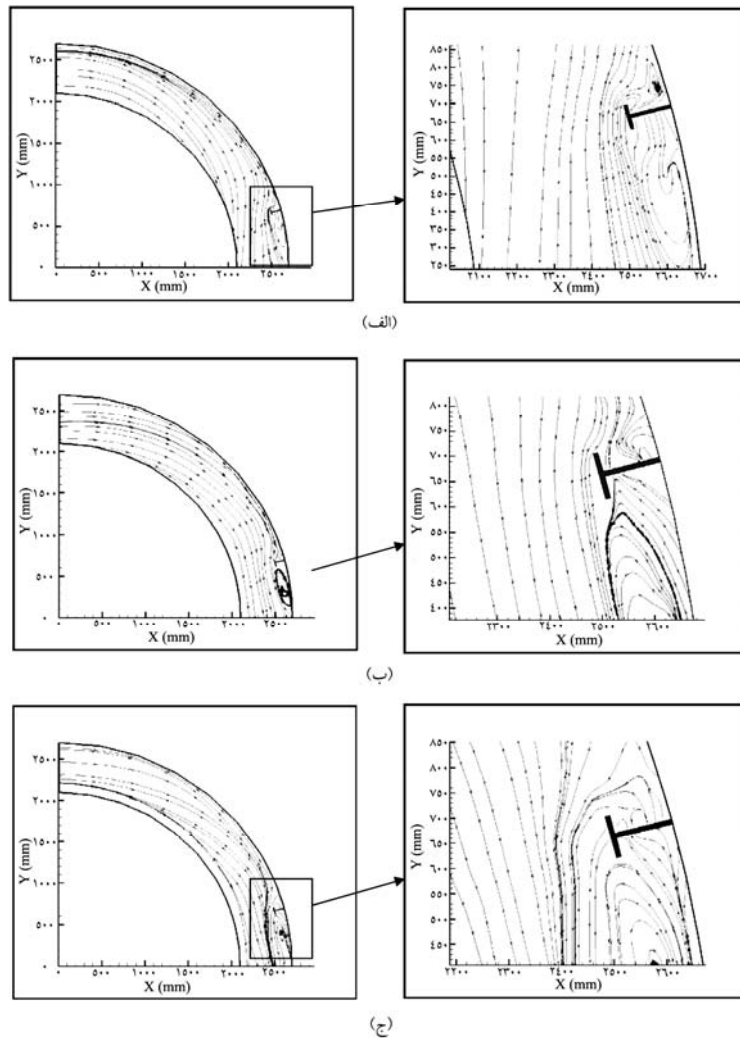
شکل ۷- نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع مختلف عرضی پایین دست قوس ۹۰ درجه با آبشکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر صلب (الف) ۷۵، (ب) ۷۵/۵، (ج) ۷۷/۵، (د) ۸۰، (ر) ۸۵ و (ی) ۹۰ درجه.

شکل (۸) نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع طولی قوس بین زاویه ۶۰ تا ۹۰ درجه را در حالت استقرار آبشکن در زاویه ۷۵ درجه و با بستر صلب نشان می‌دهد. در فاصله ۱۵ میلی‌متری از ساحل خارجی همان‌طور که در شکل (۸-الف) مشخص است در بالادست آبشکن جریان‌های بازگشتی با مسیری در خلاف جهت جریان اصلی مشاهده می‌گردد. این جریان تا عمق ۵ سانتی‌متری به صورت گردابه‌ای با محور عمود بر مسیر جریان و جهت رو به پایین نمایان می‌شود. علت تشکیل این نوع گردابه، برخورد جریان با مانع آبشکن و حرکت در خلاف جهت جریان می‌باشد که در فاصله معادل یک برابر طول آبشکن نیروی جریان اصلی بر جریان بازگشتی غالب می‌شود و با توجه به نزدیک بودن فاصله تا ساحل خارجی جهتی رو به پایین دارد. این جریان در محل اتصال آبشکن به ساحل خارجی به صورت جریان بازگشتی با حرکت رو به بالا می‌باشد. در پایین دست آبشکن نیز از فاصله حدود ۸ برابر طول آبشکن جریان بازگشتی به سمت جان آبشکن مشاهده می‌شود. علت وجود این جریان‌ها تمایل خطوط جریان به حرکت به سمت منطقه با فشار کمتر می‌باشد و منطقه بین بال پایین دست آبشکن و ساحل خارجی این خصوصیت را دارد. این جریان در برخورد با آبشکن به صورت گردابه‌هایی با محور عمود بر جریان اصلی (در جهت عرض کانال) و به صورت رو به پایین

عمل می‌کند. گردابه‌های رو به پایین در پایین‌دست آب‌شکن و در محدوده بین بال پایین‌دست آب‌شکن و ساحل خارجی به دلیل عدم برخورد جریان اصلی به آن محدوده، مشاهده می‌شود و هرچه مقاطع طولی از ساحل خارجی به بال آب‌شکن نزدیک شود نقطه شروع جریان بازگشتی در پایین‌دست به محل آب‌شکن نزدیک‌تر می‌شود. دلیل این پدیده تأثیرگذاری جریان اصلی بر خطوط جریان موجود در نزدیک ساحل خارجی می‌باشد. این نقطه شروع، در فاصله ۹۰ میلی‌متری از ساحل خارجی به سه برابر طول آب‌شکن کاهش می‌یابد. این روند در بین شکل‌های (۸-الف) تا (۸-د) مشهود می‌باشد. همچنین در بالادست آب‌شکن و با فاصله گرفتن از ساحل خارجی و جریان‌های رو به بالا مشاهده می‌شود. در نزدیکی کف بستر و دماغه بال بالادست آب‌شکن نیز جریان‌های رو به پایین در نتیجه تمرکز تنش ایجاد شده در شکل (۸-د) مشاهده می‌شود. شکل (۸-ر) و (۸-ی) بیانگر پروفیل طولی در راستای بال و بعد از بال آب‌شکن را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده کاهش تأثیر وجود آب‌شکن بر جریان عبوری می‌باشد.



شکل ۸- نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع مختلف طولی قوس ۹۰ درجه با آب‌شکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر صلب با فاصله از دیواره خارجی (الف) ۱۵ میلی‌متر، (ب) ۳۰ میلی‌متر، (ج) ۶۰ میلی‌متر، (د) ۹۰ میلی‌متر، (ر) ۱۲۰ میلی‌متر و (ی) ۱۵۰ میلی‌متر.

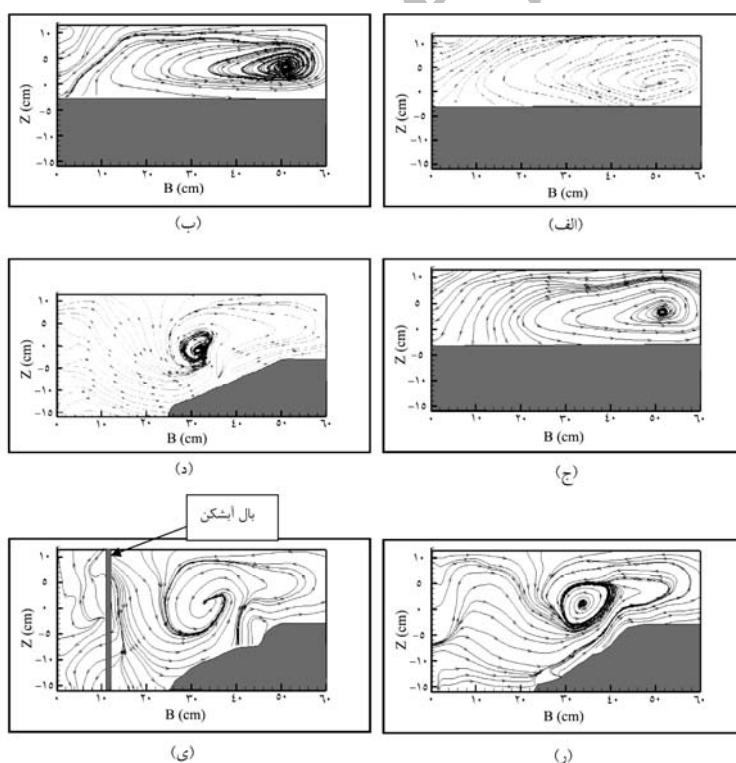


شکل ۹- نمونه‌ای از الگوی جریان در پلان‌های مختلف قوس ۹۰ درجه با آب‌شکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر صلب در فاصله از بستر (الف) ۵ میلی‌متر، (ب) ۶۰ میلی‌متر و (ج) ۱۱۵ میلی‌متر.

شکل (۹) نمونه‌ای از خطوط جریان در فاصله نزدیکی بستر، میانه عمق جریان و نزدیکی سطح آب را نشان می‌دهد. مقایسه سه پلان ارایه شده با هم بیانگر تغییر جهت خطوط جریان به طرف قوس خارجی از لایه نزدیک کف تا لایه نزدیک سطح آب می‌باشد. البته در محل استقرار آب‌شکن تأثیر

وجود آبشکن باعث انتقال خط سرعت بیشینه به سمت میانه کانال می‌شود. مشاهده محدوده اطراف آبشکن در سه پلان شده بیانگر تشکیل دو گردابه در بالادست و پایین دست آبشکن می‌باشد. گردابه ایجاد شده در پایین دست به دلیل وجود جریان‌های با سرعت کمتر در مقایسه با گردابه ایجاد شده در بالادست از ابعاد بزرگ‌تری برخوردار بوده و پایداری آن بیشتر است. این موضوع در بررسی کیفی الگوی جریان با استفاده از تزریق ماده رنگی و براده چوب نیز مشاهده گردید.

الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه تحت تأثیر آبشکن با بستر تعادل یافته: با انجام آزمایش آبشستگی در زمان تعادل در نظر گرفته شده و ثابت نگه داشتن بستر به روش ذکر شده الگوی جریان در حالت آبشستگی تعادل یافته در طول قوس ۹۰ درجه بررسی گردید. شکل (۱۰) نشان‌دهنده نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع عرضی بالادست آبشکن می‌باشد.



شکل ۱۰- نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع مختلف عرضی و در بالادست قوس ۹۰ درجه با آبشکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر تعادل یافته (الف) ۳۰، (ب) ۶۰، (ج) ۶۵، (د) ۷۲/۵، (ر) ۷۳/۷۵ و (ی) ۷۴/۵ درجه.

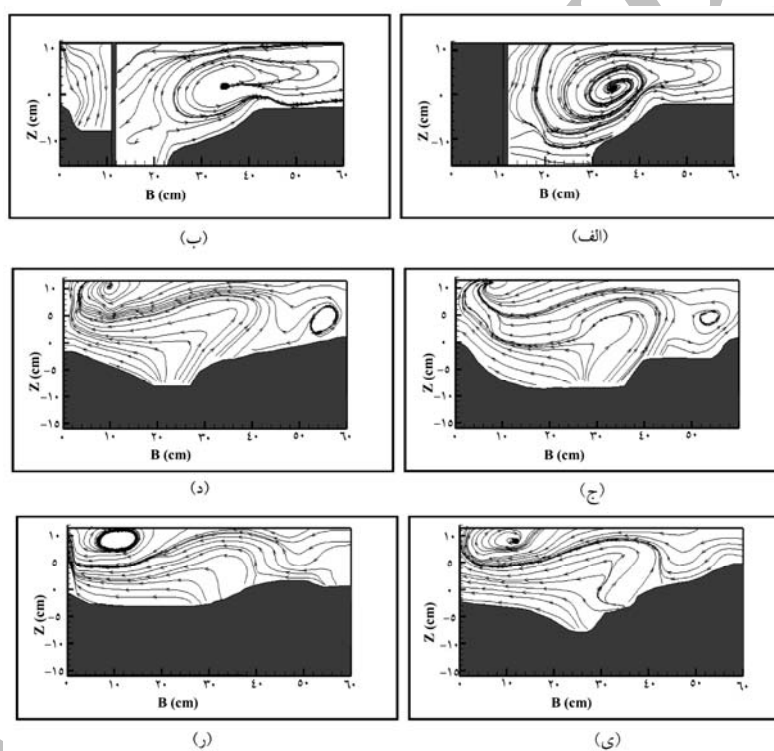


در این شکل رسوبات کف بستر با رنگ تیره مشخص شده است. در شکل‌های (۱۰-الف)، (۱۰-ب) و (۱۰-ج) جریان‌های عرضی به‌صورت جریان ثانویه اصلی و جریان ثانویه دوم در نزدیکی ساحل خارجی و سطح آب مشاهده می‌شود که مشابه الگوی جریان در قوس بدون آب‌شکن در شکل‌های (۴-الف)، (۴-ب) و (۴-ج) و الگوی جریان در قوس با آب‌شکن و بستر صلب در شکل‌های (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) می‌باشد. شکل (۱۰-د) و (۱۰-ر) مقطع عرضی در محل چاله آب‌شستگی و نیز جلو بال آب‌شکن را نشان می‌دهد. وجود آب‌شکن باعث دور شدن خطوط جریان از ساحل خارجی و تغییر در الگوی جریان ثانویه و تغییر مکان گردابه ایجاد شده در ساحل داخلی به سمت مرکز کانال می‌شود. در این حالت اندرکنش میان جریان‌های ثانویه و جریان‌های طولی باعث ایجاد تمرکز تنش و تشکیل چاله آب‌شستگی می‌گردد. شکل (۱۰-ی) مقطع عرضی نزدیک جان آب‌شکن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در محدوده بین دیواره بال بالادست و ساحل خارجی دو دسته جریان رو به بالا و رو به پایین مشاهده می‌گردد. این جریانات از لایه ۳۰ میلی‌متری زیر بستر اولیه تا سطح آب به‌صورت جریان رو به بالا و از این لایه تا کف بستر به‌صورت جریان رو به پایین می‌باشد. علت این پدیده تمایل جریان به سمت فشار مطلوب (محدوده با فشار کمتر) می‌باشد.

شکل (۱۱) نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع عرضی در پایین‌دست آب‌شکن می‌باشد. شکل (۱۱-الف) مقطع عرضی هم‌راستا با جان آب‌شکن را نشان می‌دهد. در این مقطع جریان ثانویه با شدت بیشتری به دلیل کاهش عرض مقطع مشاهده می‌شود گسترش چاله آب‌شستگی به سمت ساحل خارجی در این ناحیه نیز از بیشترین مقدار برخوردار است.

شکل (۱۱-ب) نیز الگوی جریان را در نزدیکی جان آب‌شکن نشان می‌دهد. جریان‌های رو به پایین در محدوده بین دیواره بال پایین‌دست و ساحل خارجی و ناشی از جریانات بازگشتی به سمت آب‌شکن و گردابه‌های با محور عمود بر جریان دیده می‌شود. بعد از دیواره بال نیز جریان ثانویه مشاهده می‌گردد. در مقاطع دورتر از آب‌شکن به دلیل تغییرات توپوگرافی بستر الگوی جریان تغییر می‌کند. از مشخصات بارز این مقاطع تشکیل دو گردابه با محوری هم‌راستا با مسیر جریان می‌باشد.

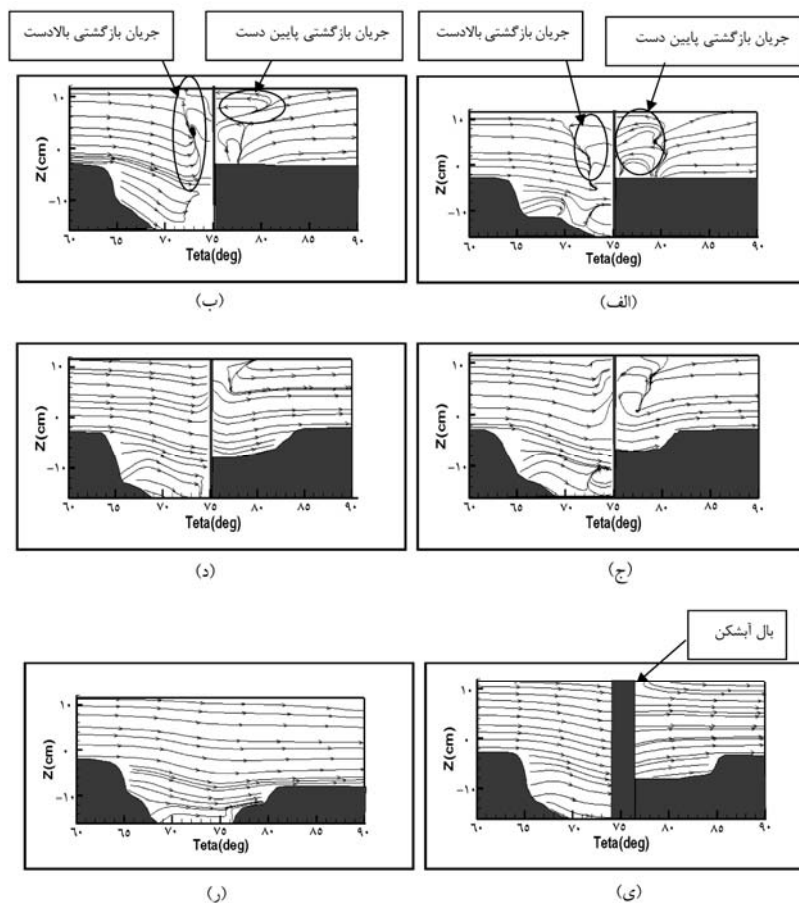
یکی از این گردابه‌ها در نزدیکی دیواره داخلی قرار دارد و دیگری در نزدیکی دیواره خارجی و در لایه‌های بالایی و مشابه جریان ثانویه دوم ایجاد شده در شکل (۷-ی) و (۷-ر) در شرایط آب‌شکن با بستر صلب می‌باشد. در مقایسه با مقاطع موجود در بالادست آب‌شکن با بستر صلب، تغییر در الگوی جریان ثانویه را در آزمایش با بستر تعادل‌یافته می‌توان ناشی از تغییرات توپوگرافی بستر دانست.



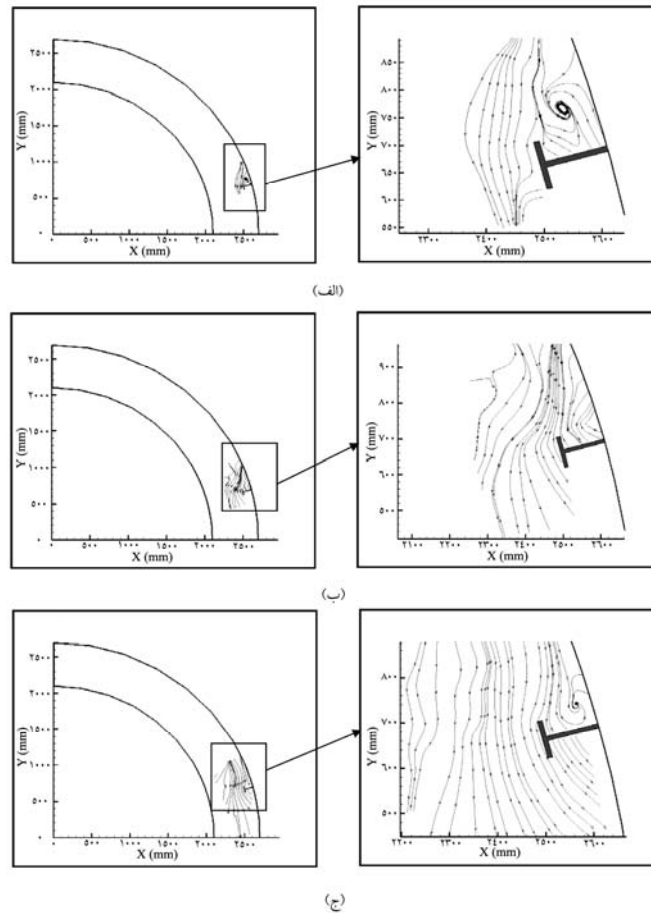
شکل ۱۱- نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع مختلف عرضی پایین‌دست قوس ۹۰ درجه با آب‌شکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر تعادل‌یافته (الف) ۷۵، (ب) ۷۵/۵، (ج) ۷۷/۵، (د) ۸۰، (ر) ۸۵ و (ی) ۹۰ درجه.

شکل (۱۲) نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع طولی قوس ۹۰ درجه همراه با آب‌شکن مستقر در موقعیت ۷۵ درجه با بستر تعادل یافته را نشان می‌دهد. شکل (۱۲-الف) و (۱۲-ب) مقاطع در فاصله ۱۵ و ۳۰ میلی‌متری از قوس خارجی می‌باشد. در این مقاطع جریان‌های بازگشتی در خلاف جهت جریان اصلی در بالادست و پایین‌دست آب‌شکن مشاهده می‌شود در بالادست علت این جریان‌ها برخورد جریان اصلی به آب‌شکن و تمایل جریان برای خروج از محدوده بین دیواره بال بالادست و ساحل خارجی می‌باشد. در پایین‌دست آب‌شکن نیز به دلیل این که دیواره بال آب‌شکن T شکل باعث سوق دادن جریان به سمت وسط کانال می‌شود، جریان به سمت ساحل خارجی که فشار کمتری دارد متمایل می‌گردد. جریانات بازگشتی از فاصله حدود سه برابر طول آب‌شکن در پایین‌دست به سمت جان آب‌شکن و در خلاف جهت جریان شکل می‌گیرد. همچنین با توجه به، به وجود آمدن چاله آب‌شستگی، جریان از نزدیکی سطح بستر اصلی به صورت جریان رو به پایین عمل می‌کند که این روند در شکل‌های (۱۲-الف) تا (۱۲-ی) قابل مشاهده می‌باشد. تغییر توپوگرافی بستر در پایین‌دست آب‌شکن و میزان آب‌شستگی از فاصله ۶۰ میلی‌متری از ساحل خارجی در شکل (۱۲) قابل مشاهده می‌باشد.

در شکل (۱۳) نمونه‌ای از الگوی جریان داخل چاله آب‌شستگی و در ترازهای مختلف را نشان می‌دهد. شکل (۱۳-الف)، (۱۳-ب) و (۱۳-ج) در بالادست آب‌شکن گردابه‌هایی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت مشاهده می‌شود که دلیل آن ورود جریان به چاله آب‌شستگی و چرخش جریان جهت خارج شدن از محدوده بین دیواره بال و ساحل خارجی می‌باشد. در پایین‌دست آب‌شکن نیز در پلان‌های ۱۳۰- و ۸۰- میلی‌متری آب‌شستگی مشاهده نمی‌شود و این از خصوصیات آب‌شکن T شکل می‌باشد. در پلان ۳۰- میلی‌متری جریان‌های نزدیک بال آب‌شکن کمی به سمت ساحل خارجی متمایل می‌شود که منجر به آب‌شستگی اطراف دیواره بال پایین‌دست می‌شود.



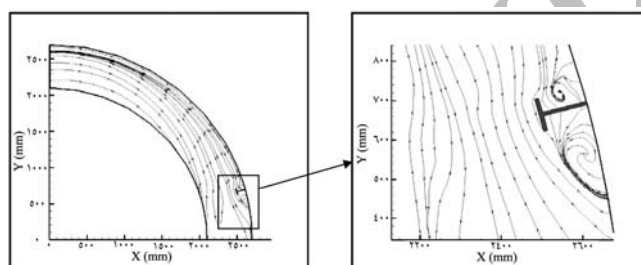
شکل ۱۲- نمونه‌ای از الگوی جریان در مقاطع مختلف طولی قوس ۹۰ درجه با آب‌شکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر تعادل یافته با فاصله از دیواره خارجی (الف) ۱۵ میلی‌متر، (ب) ۳۰ میلی‌متر، (ج) ۶۰ میلی‌متر، (د) ۹۰ میلی‌متر، (ر) ۱۲۰ میلی‌متر و (ی) ۱۵۰ میلی‌متر.



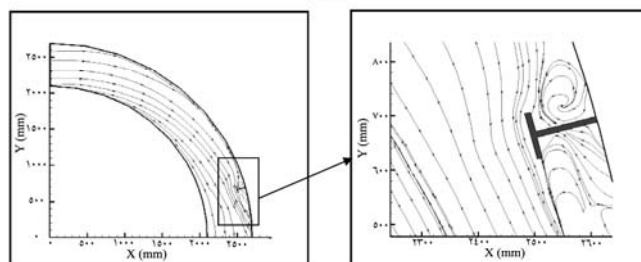
شکل ۱۳- نمونه‌ای از الگوی جریان در پلان‌های مختلف قوس ۹۰ درجه با آب‌شکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر تعادل یافته درون چاله آب‌شستگی در فاصله از بستر اولیه (الف) ۳۰- میلی‌متر، (ب) ۸۰- میلی‌متر و (ج) ۱۳۰- میلی‌متر.

شکل (۱۴) نمونه‌ای از الگوی جریان بالای سطح بستر اولیه را نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های (۱۴-الف) تا (۱۴-ج) بیانگر تغییر جهت خطوط جریان به سمت ساحل خارجی نزدیکی بستر (۵ میلی‌متر) تا نزدیکی سطح جریان (۱۱۵ میلی‌متر) می‌باشد. این روند در مورد قوس تنها در شکل‌های (۵-الف) تا (۵-ج) و در مورد قوس با آب‌شکن با بستر صلب در شکل‌های (۹-الف) تا (۹-ج) مشاهده می‌شود. همچنین مناطق بزرگ‌نمایی شده اطراف آب‌شکن بیانگر وجود دو گردابه افقی در بالادست و پایین‌دست آب‌شکن و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌باشد. این گردابه‌ها در مورد

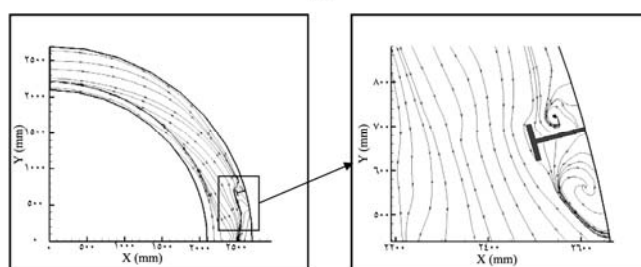
قوس با آب‌شکن با بستر صلب نیز در شکل‌های (۹- الف) تا (۹- ج) مشاهده می‌شود. در مورد آب‌شکن با بستر تعادل‌یافته گردابه‌های بالادست از پایداری و ابعاد بیشتری برخوردار می‌باشد که این به دلیل وجود چاله آب‌شستگی و تأثیر جریان‌های درون چاله می‌باشد ولی گردابه‌های پایین‌دست در آب‌شکن با بستر تعادل‌یافته از پایداری و ابعاد کوچک‌تری برخوردار است که این مسأله همان‌طور که در پلان‌های طولی شکل (۱۲) مشاهده می‌شود به علت تغییرات شدید توپوگرافی بستر در پایین‌دست آب‌شکن و تأثیر پشته‌های رسوبی و چاله‌های آب‌شستگی پایین‌دست بر الگوی جریان می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۴- نمونه‌ای از الگوی جریان در پلان‌های مختلف قوس ۹۰ درجه با آب‌شکن مستقر در زاویه ۷۵ درجه و بستر تعادل‌یافته در بالای چاله آب‌شستگی در فاصله از بستر اولیه (الف) ۵ میلی‌متر، (ب) ۶۰ میلی‌متر و (ج) ۱۱۵ میلی‌متر.

### نتیجه گیری

- در قوس بدون آبشکن جریان ثانویه دوم در نزدیکی ساحل خارجی و سطح آب بین زاویه ۴۵ تا ۷۰ درجه تشکیل می‌شود.
- در قوس بدون آبشکن زاویه بین خطوط P جریان در سطح و در نزدیکی بستر به‌طور متوسط بین ۱۵ تا ۲۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت و به سمت ساحل خارجی می‌باشد.
- استقرار آبشکن باعث زودتر تشکیل شدن جریان ثانویه دوم در مقاطع ابتدایی قوس می‌شود.
- تأثیر آبشکن با بستر صلب برروی الگوی جریان از فاصله حدود ۸ برابر طول آبشکن در بالادست آن می‌باشد.
- در مقطع نزدیک جان آبشکن و در داخل محدوده بین دیواره بال بالادست و ساحل خارجی با بستر صلب، جریان رو به بالا حاکم است. در حالت آبشکن با بستر تعادل‌یافته، از نزدیکی سطح بستر به سمت عمیق‌ترین قسمت چاله جریان رو به پایین و به سمت سطح آب جریان رو به بالا می‌باشد.
- در مقطع نزدیک جان آبشکن و در داخل محدوده بین دیواره بال پایین‌دست و ساحل خارجی در حالت آبشکن با بستر صلب و آبشکن با بستر تعادل‌یافته، جریان رو به پایین می‌باشد.
- در حالت آبشکن با بستر صلب، در مقطعی به فاصله حدود یک تا دو برابر طول آبشکن در پایین‌دست تا یک سوم عرض کانال، جریان تحت‌تأثیر حضور آبشکن می‌باشد و از آن به بعد الگوی جریان ثانویه حاکم است.
- در حالت آبشکن‌های با بستر صلب و بستر تعادل‌یافته، جریان ثانویه دوم در مقاطع عرضی انتهایی قوس و در نزدیکی ساحل خارجی و در لایه‌های بالایی تشکیل می‌گردد.
- جریان‌های بازگشتی در بالادست و پایین‌دست آبشکن با بستر صلب و تعادل‌یافته شکل می‌گیرد. این جریان‌ها در پایین‌دست تا فاصله بیشتری از ساحل خارجی نسبت به بالادست تشکیل می‌شود.
- شروع جریان بازگشتی در پایین‌دست آبشکن در آبشکن با بستر صلب از ۸ برابر طول آبشکن و با بستر تعادل‌یافته از ۳ برابر طول آبشکن می‌باشد.
- در مقاطع بالادست، تغییر در الگوی جریان ثانویه را در آزمایش با بستر تعادل‌یافته در مقایسه با مقاطع موجود در بالادست آبشکن با بستر صلب می‌توان ناشی از تغییرات توپوگرافی بستر دانست.

- دو گردابه افقی در پلان‌های مختلف در بالادست و پایین‌دست آب‌شکن با بستر صلب و تعادل‌یافته و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت تشکیل می‌شود. در حالت آب‌شکن با بستر تعادل‌یافته گردابه‌های بالادست از پایداری و ابعاد بیشتری برخوردار می‌باشد ولی گردابه‌های پایین‌دست در آب‌شکن با بستر تعادل‌یافته از پایداری و ابعاد کوچک‌تری برخوردار است.

### منابع

1. Ahmed, F., and Rajaratnam, N. 2000. Observations on flow around bridge abutment. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 126: 1. 51-59.
2. 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, 15: 4. 221-237.
3. 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, 20: 6. 771-785.
4. Dey, S., and Barbhuiya, A.K. 2005. Turbulent flow field in a scour hole at a semicircular abutment. Canadian Journal of Civil Engineering, 32: 1. 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, 17: 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. P 345-356, 32<sup>nd</sup> 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, 15: 301-309.
8. Graf, W.H., and Istiarto, I. 2002. Flow pattern in the scour hole around cylinder. Journal of Hydraulic Research, 40: 1. 13-20.
9. Melville, B.W., and Raudkivi, R.J. 1977. Flow characteristics in local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 15: 4. 373-380.
10. Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B.A. 1983. Flow near groin-like structures. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109: 3. 463-480.
11. Salajeghe, M. 2003. Experimental study of flow pattern around spur dike in 180 degree bend with rigid bed, Ph.D. Thesis, Tehran University, Iran. 231p. (In Persian).
12. Tingsanchali, T., and Maheswaran, S. 1990. 2-D Depth-Averaged Flow computation Near Groin. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116: 1. 71-86.





Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 16(2), 2009*  
[www.gau.ac.ir/journals](http://www.gau.ac.ir/journals)

## **Experimental Study on 3D Flow Field around T Shaped Spur Dike in a 90 Degree Bend**

**\*M. Vaghefi<sup>1</sup>, M. Ghodsian<sup>2</sup> and S.A.A. Salehi Neyshabouri<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran,

<sup>2</sup>Professor, Water Engineering Research Center, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

### **Abstract**

This study experimentally measures the 3D flow field around the 90 degree bend as well as the bend with the T-shaped spur dike at 75-degree section. The experiments were carried out in a channel with a mild curvature. The three-dimensional Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) was used for measuring the flow field. The three-dimensional time-averaged velocity in the 90-degree bend without spur dike and the bend with spur dike was measured. In addition in the bend with spur dike two cases of rigid bed and the bed with scour hole were compared. The longitudinal and lateral flow pattern were compared. The effects of spur dike on flow pattern were examined. In addition, the vortices and reverse flows in the up and down stream of the spur dike as well as the changes in the secondary flow are addressed in this study. The results showed that reverse flows in downstream and upstream of spur dike with rigid or equilibrium bed were formed. Flows formed in downstream were in the greater distance from outer bank than upstream. Also, the start of reverse flow of spur dike with rigid bed was noticeable within a downstream distance of 8 times spur dike length and in spur dike with equilibrium bed of 3 times spur dike length.

**Keywords:** 3D Flow Pattern, T Shape Spur Dike, Secondary Flow

---

\* Corresponding Auyhor; Email: [vaghefi@pgu.ac.ir](mailto:vaghefi@pgu.ac.ir)