

## مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان پیرامون آبشکن‌های سری ساده در کانال پیچان رودی با جداره شیب‌دار فرسایش‌پذیر

پدرام اسمعیلی<sup>۱</sup>، سیامک بوداقیپور<sup>۲\*</sup>، محمد رستمی<sup>۳</sup> و مهدی میرزایی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری عمران آب، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، <sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، <sup>۳</sup> استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران و <sup>۴</sup> استادیار، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶

### چکیده

آبشکن به‌عنوان یکی از مرسوم‌ترین سازه‌های ساماندهی رودخانه به‌منظور کاهش فرسایش سواحل و کناره‌های رودخانه شناخته شده است. این سازه‌ها با طول و زاویه مناسب نسبت به راستای جریان از دیواره طبیعی رودخانه توسعه یافته، سبب انحراف جریان از کناره‌ها و هدایت آن به سمت محور مرکزی رودخانه می‌شوند. در این پژوهش آزمایشگاهی، الگوی جریان پیرامون آبشکن‌های سری ساده در کانال پیچان رودی با جداره شیب‌دار فرسایش‌پذیر متشکل از سه قوس متوالی با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۴۵ درجه، برای دبی‌های ۴۰، ۳۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه مطالعه شده است. نتایج بیانگر این است که موقعیت برخورد اولین خط جریان در تراز نزدیک بستر به جداره داخلی قوس شماره ۲ در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه زودتر از دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه زودتر از دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه صورت گرفته است. به طوری که موقعیت برخورد اولین خط جریان در تراز نزدیک بستر به جداره داخلی قوس شماره ۲ در دبی‌های ۴۰، ۳۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب در زوایای ۱۸-، ۱۵- و ۱۰- درجه نسبت به محور مرکزی قوس مذکور صورت گرفته است. در شرایط حضور آبشکن‌ها، ابعاد گردابه‌ها با حرکت در عمق تغییر می‌کنند، به این صورت که با حرکت به سمت سطح آب در یک دبی ثابت، به دلیل تمایل جریان به جداره خارجی، شیب‌دار بودن جداره قوس و افزایش سطح تماس طول آبشکن، ابعاد گردابه افزایش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** بررسی آزمایشگاهی، جریان ثانویه، گردابه‌ها، فرسایش کناره، کانال قوسی

### مقدمه

آبشکن‌ها در الگوی جریان، فرسایش کناره و بستر تغییراتی ایجاد می‌کنند. احداث آن‌ها منجر به کاهش عرض مجرا و در نتیجه، افزایش سرعت جریان عبوری و تنش برشی وارده بر کف می‌شود. در صورتی که بستر و کناره فرسایش‌پذیر باشد، این مسئله موجب وقوع فرسایش و آبستنگی در اطراف آن می‌شود. بنابراین، با توجه به تاثیرات مهمی که پس از احداث آبشکن

احداث آبشکن در رودخانه‌ها می‌تواند به دلایل مختلفی انجام شود. از جمله این دلایل، می‌توان به حفاظت کناره‌های رودخانه‌ها در مقابل فرسایش، انحراف جریان، افزایش عمق آب، ایجاد رسوبگذاری و ... اشاره کرد. آبشکن‌ها می‌توانند به صورت تک یا سری در مسیرهای مستقیم یا قوسی استفاده شوند.

خارجی کانال جابه‌جا می‌شود. Keshavarzi و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی جریان در اطراف آبشکن مستغرق در یک کانال مرکب پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اندازه حرکت و انرژی جنبشی در دو جهت کاهش می‌یابد و خطوط جریان از دیواره‌ها به کانال اصلی انحراف می‌یابند. Mousavi Naeini و همکاران (۲۰۱۰) الگوی جریان اطراف آبشکن T شکل را در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که الگوی جریان شکل گرفته پیرامون آبشکن T شکل، تشکیل دو گردابه پاد ساعت‌گرد در بالادست و پایین دست آبشکن را به همراه خواهد داشت. Acharya و Duan (۲۰۱۱) به مطالعه عددی سه بعدی الگوی جریان آشفته پیرامون سری آبشکن‌های تیغه‌ای واقع در مسیر مستقیم با بستر ثابت و متحرک با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. آن‌ها از شبیه‌سازی آشفته‌گی  $K-\epsilon$  برای شبیه‌سازی استفاده کرده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. Xiufang و همکاران (۲۰۱۲) الگوی جریان آشفته پیرامون تک آبشکن با هندسه متفاوت را مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده آن‌ها بیانگر این بود که بیشترین شدت آشفته‌گی پیرامون آبشکن دوزنقه‌ای به وقوع می‌پیوندد. Sharma و Mohapatra (۲۰۱۲) به بررسی جریان اطراف آبشکن در یک کانال پیچان‌رودی با مقطع دوزنقه‌ای و بستر صلب پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که منطقه جداسازی مطابق با محل احداث آبشکن تغییر می‌کند و در ارتفاعات بالا در مقایسه با ارتفاعات نزدیک بستر، عریض‌تر می‌شود. Jamieson و همکاران (۲۰۱۳) دینامیک رسوب و جریان سه بعدی در قوس کانال را با حضور و عدم حضور آبشکن مستغرق مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که در صورتی که آبشکن‌ها سبب ایجاد جریان ثانویه اضافی شوند، ناحیه ساحل ممکن است با وجود آبشکن‌ها باز هم در خطر فرسایش باشد و یا حتی فرسایش آن بیشتر از حالتی باشد که آبشکن وجود ندارد. Vaghefi و همکاران (۲۰۱۴) به صورت عددی اثر عدد فرود و درصد استغراق بر الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه با جداره قائم را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بررسی

ایجاد می‌شود، مطالعه و بررسی در خصوص آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است که در ادامه به ذکر خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته پرداخته می‌شود. Ettema و Muste (۲۰۰۴) آزمایشاتی را در یک کانال مستقیم با بستر صلب و پهنای ثابت به منظور تعیین اثر حضور آبشکن بر الگوی جریان و تعیین نواحی جداسازی در بالادست و پایین دست انجام دادند. آن‌ها به وقوع ناحیه چرخشی در بالادست، ناحیه جداسازی و چرخشی بزرگ در پایین دست و نیز گردابه‌های آشفته‌گی حاصل از نوسانات لایه برشی اشاره کردند. Nagata و همکاران (۲۰۰۵) به شبیه‌سازی الگوی جریان سه بعدی حول تک آبشکن با بستر متحرک پرداختند و ضمن تحلیل ساختار جریان متوسط، ارتباط آن را با نحوه وقوع و توسعه حفره آشفته‌گی بررسی کردند. بر اساس نتایج این پژوهشگران، در لحظه شروع محاسبات خطوط جریان در محل دماغه متمرکز شده ولی در حالت بستر متعادل، به واسطه تشکیل حفره آشفته‌گی، ابعاد ناحیه چرخشی گسترش یافته، خطوط جریان به سمت مرکز کانال منتقل شده‌اند. در حالت بستر تخت، جریان‌های چرخشی به اندازه کافی توسعه نیافته ولی با وقوع حفره آشفته‌گی، جریان‌های چرخشی تشدید شده، ضمن افزایش شدت جریان رو به پایین در وجه بالادست آبشکن، جریان برگشتی نزدیک کف نیز تشدید می‌شود. Zhang و همکاران (۲۰۰۹) الگوی جریان در اطراف آبشکن‌های نفوذناپذیر را با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی، در شرایط آب زلال بررسی کردند. بر اساس مقایسه میان نتایج آزمایشگاهی و عددی، نتیجه گرفتند که مدل آشفته‌گی  $k-\epsilon$  برای شبیه‌سازی جریان آشفته مناسب‌تر است. Abhari و همکاران (۲۰۱۰) مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان را پیرامون آبشکن در قوس ۹۰ درجه با جداره قائم و بستر صلب در شرایط تغییر موقعیت آبشکن در طول کانال و هندسه ثابت انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که خطوط جریان در تراز نزدیک بستر به سمت جداره داخلی، و در تراز نزدیک سطح آب به سمت جداره خارجی متمایل می‌شوند. همچنین، محل وقوع بیشینه سرعت طولی در ابتدای قوس، در نیمه داخلی مقطع، سپس، به سمت دیواره

آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل عددی نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند با دقت مناسبی الگوی جریان را در اطراف آبشکن‌های منفرد و سری آبشکن‌ها شبیه‌سازی کند. Kumar و همکاران (۲۰۱۸) آبشستگی اطراف آبشکن‌های ساده و T شکل را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که آبشکن T شکل در حفاظت از بستر و کاهش عمق آبشستگی و خرابی‌های سازه‌های آبی موثرتر است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود، جاهایی که سازه‌های آبی باید حفاظت شود، آبشکن T شکل مورد استفاده قرار گیرد و آبشکن ساده باید در مواقعی که انحراف و جابه‌جایی جریان اهمیت دارد، استفاده شود. علت این امر نیز هزینه ساخت بیشتر آبشکن T شکل بیان شده است.

Vaghefi و همکاران (۲۰۱۸) به مطالعه شرایط جریان در اطراف آبشکن T شکل، با حضور سازه محافظ، پرداختند. نتایج این مطالعه بیانگر این است که بیشینه تنش برشی بستر برای سازه محافظ در حالت‌های جاذب و دافع به ترتیب  $23/5$  و  $17/6$  درصد نسبت به حالت عمود افزایش یافته است. همچنین، قدرت جریان ثانویه در نزدیکی آبشکن اصلی برای زوایای کمتر از  $15$  درجه در حالت‌های جاذب و دافع نسبت به حالت عمود به ترتیب  $24$  و  $14/5$  درصد افزایش یافت. این مقادیر برای زوایای  $20$  تا  $30$  درجه در حدود  $14/6$  و  $15/5$  درصد کاهش می‌یابد.

همان‌طور که ملاحظه شد، مطالعات گذشته بیشتر متمرکز بر روی کانال‌های قوسی شکل با جداره قائم صلب در شرایط تک آبشکن یا آبشکن‌های سری بوده، کمتر به شیب‌دار بودن جداره توجه شده است. به همین دلیل، در مطالعه حاضر، شیب‌دار و فرسایش‌پذیر بودن جداره قوس و اثر تغییرات دبی بر الگوی جریان در یک کانال پیمان‌رودی متشکل از سه قوس با زوایای  $45$ ،  $90$  و  $45$  درجه مورد توجه قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

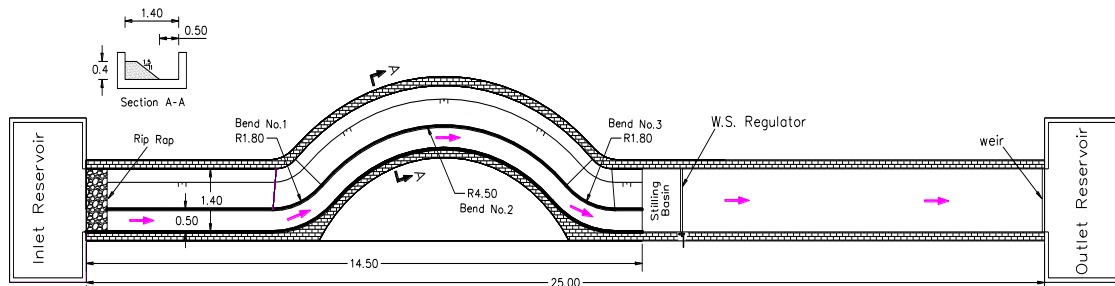
آزمایش‌ها در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در کانالی بتنی به صورت ترکیبی از مسیر مستقیم و قوسی به طول  $26$  متر و به شکل مستطیل

کرده، نتیجه گرفتند که با افزایش عدد فرود در پایین‌دست آبشکن، فاصله جریان‌های بازگشتی از جان آبشکن حدود  $10$  درصد بیشتر شده، همچنین، در نزدیکی دیواره‌های داخلی با افزایش استغراق آبشکن، سرعت طولی به نصف سرعت اولیه کاهش می‌یابد.

Elyasi و همکاران (۲۰۱۶) اثر تنگ‌شدگی مقطع ناشی از حضور آبشکن در قوس بر الگوی جریان را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف به ازای تنگ‌شدگی‌های  $10$ ،  $20$  و  $25$  درصدی مقطع کانال بیان‌گر این است که با افزایش تنگ‌شدگی مقطع، نوسانات سطح آب نیز بیشتر شده، بیشترین ارتفاع در بالادست و کمترین ارتفاع در پایین‌دست مربوط به آبشکن با ابعاد بزرگ‌تر است. علاوه بر این، گردابه‌ها نیز در طول بیشتری از قوس در ناحیه پایین‌دست آبشکن ظاهر می‌شوند. Iranshahi و همکاران (۲۰۱۶) آبشکن سرسپری را به صورت سری در قوس تند مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، میزان آبشستگی برای آبشکن اول بیش از آبشکن دوم و سوم است. این مسأله نشان‌دهنده آن است که بستر پیرامون آبشکن اول باید با استفاده از روش‌های حفاظتی، در برابر آبشستگی محافظت شود. Zare و Honar (۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی اثر آبشکن ساده بر کاهش فرسایش کناره در قوس رودخانه پرداختند. نتایج نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی در پای آبشکن‌های مربوط به آبشکن عمودی است و در هر سه نوع آرایش عمودی، دافع و جاذب، آبشکن اول بیشترین عمق آبشستگی و آبشکن آخر از کمترین عمق برخوردار است.

Vaghefi و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه آزمایشگاهی جریان سه‌بعدی اطراف آبشکن T شکل در قوس با جداره قائم صلب پرداختند و نشان دادند که جریان ثانویه از  $30$  درجه آغاز می‌شود و تا  $65$  درجه به صورت کاهشی ادامه دارد. در این مطالعه، گردابه و جریان معکوس در بالادست و پایین‌دست آبشکن و تغییرات جریان ثانویه نیز بررسی شده است. Aezzi و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل عددی هیدرودینامیکی و انتقال رسوب CCHE2D به شبیه‌سازی الگوی جریان و تغییرات بستر آبراهه در اطراف سازه آبشکن ساده پرداختند. مقایسه نتایج

تصویری شماتیک از پلان کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. برای ایجاد دیواره شیب‌دار در سمت چپ کانال آزمایشگاهی از مصالح ماسه‌ای با قطر  $D_{50}=2/9$  میلی‌متر و انحراف معیار  $\sigma_g=1/31$  استفاده شده است. با توجه به آن که انحراف معیار مصالح کمتر از  $1/5$  محاسبه شده است، بنابراین، مصالح استفاده شده دیواره کانال دارای یکنواختی است. به منظور ایجاد جداره فرسایش‌پذیر، ابتدا، از سمت راست مقطع کانال به میزان  $0/5$  متر به عنوان عرض کف در نظر گرفته شد و سپس، با استفاده از مصالح منتخب، جداره‌ای فرسایش‌پذیر با شیب  $1:1/5$  (یک عمودی به  $1/5$  افقی) در سمت چپ کانال ایجاد شد. کف کانال آزمایشگاهی صلب و از جنس بتن ساخته شده است. مقطع نهایی مورد آزمایش مطابق برش A-A می‌باشد که در شکل ۱ نمایش داده شده است. دبی جریان در طول آزمایش،  $30$ ،  $35$  و  $40$  لیتر بر ثانیه و عمق آب  $12$  سانتی‌متر بوده، تراز سطح آب با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری نقطه‌ای point gage با دقت  $0/20$  میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. داده‌های آزمایشگاهی موجود شامل داده‌های مربوط به سرعت در دو حالت حضور و عدم حضور آبشکن‌هاست.



شکل ۱- شماتیک پلان کانال آزمایشگاهی

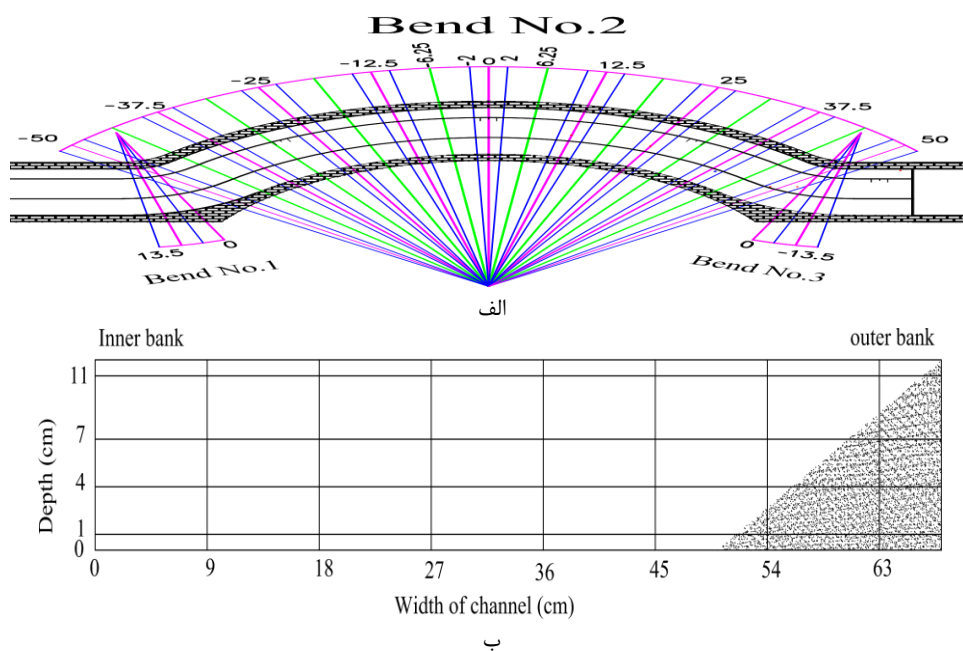
شماره ۲ (قوس  $90^\circ$  درجه) و قسمتی از قوس شماره ۱ و ۳ توسعه داده شد. برای هر یک از قوس‌های شماره ۱ و ۳ نیز به صورت مجزا، چهار مقطع عرضی مطابق شکل ۲ انتخاب شد. در هر یک از مقاطع، هفت نقطه در راستای شعاعی و چهار نقطه با فاصله از بستر برابر یک، چهار، هفت و  $11$  سانتی‌متری در راستای عمق برای اندازه‌گیری مولفه سرعت تعیین شد. الگوی جریان در مقاطع مختلف با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج دوبعدی در شرایط حضور و عدم حضور

به عرض  $1/4$  متر و ارتفاع  $0/6$  متر انجام گرفته است که طول تصویر ظاهری کانال بر روی محور افقی  $25$  متر می‌باشد. به عبارتی، قوس‌های ایجاد شده در کانال، موجب افزایش یک متری طول کانال شده است. در بالادست این کانال، یک مخزن آرام‌کننده وجود دارد که به وسیله یک تبدیل به کانال آزمایشگاهی متصل می‌شود. برای جلوگیری از فرسایش جداره شیب‌دار کانال و همچنین، کاهش تلاطم جریان، حوضچه آرامشی به طول تقریبی یک متر و متشکل از مصالح درشت‌دانه در بخش ورودی کانال ایجاد شده است. پس از حوضچه آرامش، کانال با شکل پلان مستقیم و به طول تقریبی چهار متر طی مسیر کرده، به قوس‌های متوالی منتهی می‌شود. پس از قوس‌های متوالی نیز مجدد کانال با شکل پلان مستقیم و به طول حدود  $11$  متر به مخزن تخلیه کننده متصل می‌شود. بازه قوسی شکل که ترکیبی از قوس چپ‌گرد، راست‌گرد و سپس، چپ‌گرد است، دارای طولی برابر  $10$  متر می‌باشد که این بازه قوسی با زوایای  $45^\circ$ ،  $90^\circ$  و  $45^\circ$  درجه به یکدیگر متصل شده‌اند. یک سرریز مستطیلی برای اندازه‌گیری دبی جریان و یک دریچه برای تنظیم سطح آب در انتهای کانال در نظر گرفته شد. شکل ۱،

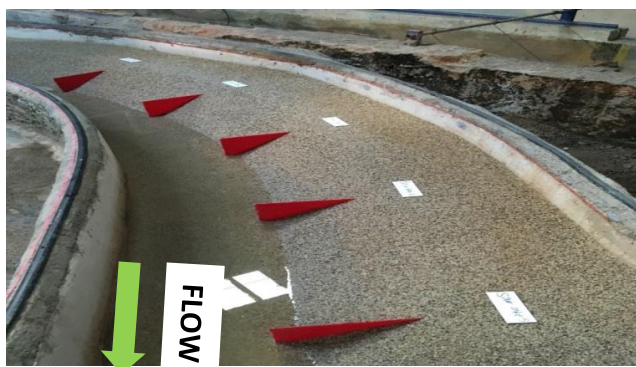
به منظور برداشت سرعت، شبکه‌بندی مطابق شکل ۲- الف و ب طراحی شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقاطع برداشت اطلاعات سرعت جریان در محل آبشکن‌ها و محدوده بین دو آبشکن قرار دارند. به منظور بررسی تاثیر آبشکن‌ها و همچنین، افزایش دقت الگوی جریان، دو مقطع به فاصله دو درجه از طرفین آبشکن انتخاب شد. به عبارتی، بین دو آبشکن، پنج مقطع عرضی برای برداشت اطلاعات آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. این الگوی برداشت برای کل قوس

ضرورت دارد که به‌منظور کنترل فرسایش و حفاظت کناره این دو قوس، آبشکن‌های دیگری طراحی و جانمایی شود. لازم به توضیح است که نیمه دوم قوس شماره ۲ دارای زاویه ۴۵ درجه می‌باشد که با احتساب زاویه ۱۲/۵ درجه بین دو آبشکن متوالی، سه آبشکن دیگر را می‌توان پس از آبشکن اول در این قوس جانمایی کرد. برای حفاظت کناره قوس شماره ۳ و جلوگیری از تاثیر آن بر تغییرات مورفولوژی قوس قبلی، آبشکن پنجم با زاویه ۱۲/۵ درجه از آبشکن چهارم قرار خواهد گرفت. بنابراین، در امتداد زاویه ۵۰ درجه از محور مرکزی قوس شماره ۲، آبشکن پنجم در قوس شماره ۳ مستقر شد. در شکل ۳، موقعیت استقرار آبشکن‌ها در قوس‌های شماره ۲ و ۳ نشان داده شده است.

آبشکن‌ها اندازه‌گیری و سپس، با استفاده از نرم‌افزار Tec Plot ترسیم شده است. آبشکن‌های مورد استفاده در این آزمایش، ساده و از جنس پلکسی‌گلاس بوده، طول آبشکن‌ها برابر ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت و ارتفاع آن‌ها به ترتیب ۰/۵ و ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. آبشکن‌ها به‌صورت قائم بر جریان و غیرمستغرق جانمایی شده‌اند. در این تحقیق و بر اساس استانداردهای موجود، فاصله بین آبشکن‌های متوالی یکسان و برابر ۱۲/۵ درجه در نظر گرفته شد. از آنجا که در آزمایش بدون حضور آبشکن، مشخص شد که شروع محدوده فرسایش، نزدیک به محور مرکزی قوس شماره ۲ و جلوتر از آن است، بنابراین، آبشکن اول بر روی این محور جانمایی شد. همچنین، بررسی‌ها نشان داد که این فرسایش در نیمه دوم قوس شماره ۲ و بخشی از قوس شماره ۳ ادامه می‌یابد. بنابراین،



شکل ۲- مش بندی کانال برای برداشت سرعت، (الف) پلان و (ب) مقطع عرضی



شکل ۳- موقعیت استقرار آبشکن‌ها در قوس

با توجه به این که قوس مذکور از زاویه و انحنای کمی برخوردار است، شرایط برای شکل‌گیری جریان‌های ثانویه فراهم نبوده، در اثر غلبه گرادیان فشار طولی بر جریان ثانویه خطوط جریان بستر موازی و متمایل به جداره داخلی قوس شماره ۲ حرکت می‌کنند. به دلیل این که طول و محدوده برخورد جریان‌های نزدیک بستر به جداره داخلی قوس شماره ۲ نسبت به قوس شماره ۱ بیشتر می‌باشد، خطوط جریان محدوده بیشتری از جداره داخلی قوس شماره ۲ را به خود اختصاص می‌دهد. نظر به این که جداره داخلی قوس مذکور قائم می‌باشد، بنابراین، خطوط جریان بستر برخورد کننده با این جداره به سمت سطح آب منحرف می‌شود. کوتاه بودن مسیر بستر تا سطح آب و همچنین، افزایش طول محدوده برخورد خطوط جریان به جداره قوس داخلی، شرایط را برای غلبه جریان‌های ثانویه بر گرادیان فشار طولی فراهم می‌کند. با تشکیل جریان‌های ثانویه، خطوط جریان منتقل شده به سطح آب در جداره داخلی قوس شماره ۲، به سمت جداره خارجی قوس که فرسایش‌پذیر می‌باشد، هدایت می‌شوند. شدت نزدیک شدن خطوط جریان سطحی به جداره خارجی قوس شماره ۲، به میزان دبی جریان خطوط جریان و در نتیجه سرعت جریان در سمت قوس خارجی افزایش می‌یابد. بررسی نتایج نشان داد که محل شروع فرسایش جداره خارجی قوس شماره ۲، به موقعیت شروع برخورد خطوط جریان بستر به جداره داخلی همان قوس بستگی دارد. مطابق شکل ۴، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، موقعیت برخورد اولین خط جریان بستر (نقطه B) به جداره داخلی قوس شماره ۲ در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه زودتر از دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه زودتر از دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه صورت گرفته است. به طوری که موقعیت برخورد اولین خط جریان بستر به جداره داخلی قوس شماره ۲ در دبی‌های ۴۰، ۳۵ و ۳۰ لیتر به ترتیب در زاویه ۱۸-، ۱۵- و ۱۰- درجه نسبت به محور مرکزی قوس مذکور صورت گرفته است. به عبارتی، با افزایش دبی جریان زاویه برخورد اولین خط جریان بستر نسبت به محور مرکزی کانال در جهت پادساعت‌گرد افزایش پیدا کرده است.

**تحلیل ابعادی:** پارامترهای زیادی در عملکرد آبشکن‌ها برای حفاظت از کناره رودخانه‌ها موثر هستند. بنابراین، در این تحقیق، به منظور یافتن رابطه بین عوامل موثر بر عقب‌نشینی کناره در پیرامون آبشکن‌ها، تحلیل ابعادی انجام شد. پارامترهای تاثیرگذار در این زمینه، مطابق با رابطه (۱) به صورت زیر است.

$$f(B, L, R, a, h, \alpha, S, \sigma_g, d_{50}, y, u, u_{cr}, \rho_s, \rho_w, g, \theta, r_b) = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $B$  عرض کانال،  $L$  طول موثر آبشکن،  $R$  شعاع مرکزی قوس،  $a$  فاصله بین آبشکن‌ها،  $h$  ارتفاع آبشکن‌ها،  $\alpha$  زاویه اتصال آبشکن به دیواره کانال،  $S$  شیب کانال،  $\sigma_g$  انحراف معیار ذرات،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات جداره کانال،  $y$  عمق جریان،  $u$  سرعت متوسط جریان،  $u_{cr}$  سرعت بحرانی،  $\rho_s$  جرم مخصوص رسوبات،  $\rho_w$  جرم مخصوص آب،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $g$  شتاب ثقل،  $\theta$  شیب دیواره کانال و  $r_b$  عقب‌نشینی کناره است. از آن جا که  $B, L, R, a, h, \alpha, S, \sigma_g, d_{50}, \rho_s, \rho_w, g, \theta$  ثابت هستند، با استفاده از تحلیل ابعادی، روش باکینگهام و حذف پارامترهای ثابت، رابطه نهایی بدون بعد به صورت زیر به دست آمد.

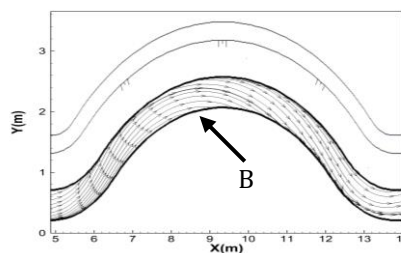
$$\frac{r_b}{y} = f(Fr) \quad (2)$$

همان‌گونه که در رابطه (۲) مشاهده می‌شود، نسبت عقب‌نشینی کناره ( $r_b$ ) به عمق جریان ( $y$ )، تابعی از عدد فرود ( $Fr$ ) است که تاثیر این پارامتر بر عقب‌نشینی نسبی کناره در شرایط حضور و عدم حضور آبشکن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

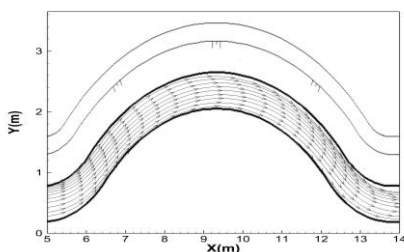
## نتایج و بحث

**بررسی الگوی جریان در قوس بدون حضور آبشکن:** شکل ۴، خطوط جریان را بدون حضور آبشکن‌ها در محدوده قوس‌های شماره ۱ تا ۳ و در تراز نزدیک بستر (یک سانتی‌متری عمق جریان از بستر) برای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. بررسی خطوط جریان در بستر نشان داد که خطوط جریان بستر پس از برخورد به جداره داخلی قوس شماره ۱ تغییر مسیر داده و به سمت سطح آب متمایل می‌شوند تا زمینه را برای غلبه جریان‌های ثانویه بر فشار طولی فراهم کنند.

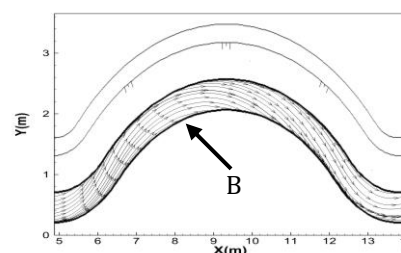
جریان در بستر این قوس به جداره داخلی برخورد می‌کند. اما به دلیل طول کم قوس شماره ۱ و همچنین، شیب‌دار بودن جداره داخلی قوس مذکور موجب شده تا جریان ثانویه قوی شکل نگیرد و گرادیان فشار طولی بر آن غلبه کند.



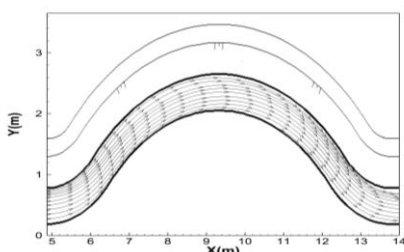
الف



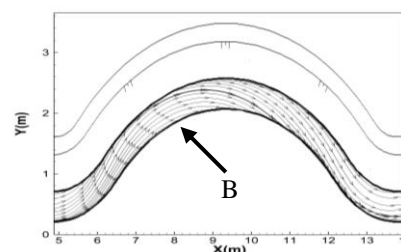
الف



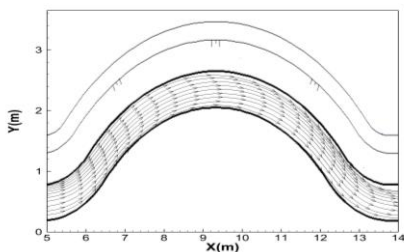
ب



ب



ج



ج

شکل ۴ - نمایش خطوط جریان در تراز نزدیک بستر، (الف) دبی ۳۰، (ب) دبی ۳۵ و (ج) دبی ۴۰ لیتر در ثانیه

شکل ۵ - نمایش خطوط جریان در تراز میانی، (الف) دبی ۳۰، (ب) دبی ۳۵ و (ج) دبی ۴۰ لیتر در ثانیه

در مقابل، با ورود جریان به قوس شماره ۲، جریان عرضی سطحی شکل گرفته است. علت آن نیز افزایش طول محدوده برخورد خطوط جریان در تراز نزدیک بستر به جداره داخلی قوس و عمودی بودن همان جداره می‌باشد که این شرایط در تقویت جریان ثانویه و غلبه آن بر گرادیان طولی فشار موثر است. تقویت جریان ثانویه در قوس شماره ۲، موجب انحراف خطوط جریان در سطح آب به سمت جداره خارجی قوس و فراهم شدن شرایط برای فرسایش آن جدار می‌شود.

شکل ۵، خطوط جریان بدون حضور آبشکن در محدوده قوس‌های شماره ۱ تا ۳ و در تراز میانی (هفت سانتی‌متری عمق جریان از بستر) را نشان می‌دهد. با دقت در مسیر خطوط جریان می‌توان بیان کرد که در عمق میانی، خطوط جریان تأثیر چندانی از شکل‌گیری جریان ثانویه نداشته، تقریباً با تبعیت از انحنای کانال آزمایشگاهی، مسیر خود را طی می‌کنند. در شکل ۶، خطوط جریان بدون حضور آبشکن‌ها در محدوده قوس‌های شماره ۱ تا ۳ و در تراز نزدیک سطح آب (۱۱ سانتی‌متری عمق جریان از بستر) را برای دبی‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که در محدوده قوس شماره ۱، خطوط جریان در نزدیکی سطح آب تقریباً به موازات انحنای قوس حرکت کرده، انحراف قابل محسوس حاصل از جریان ثانویه شکل گرفته از بستر نداشته است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، خطوط



مشاهدات آزمایشگاهی در بستر و سطح آب قوس شماره ۲ مشخص شد که افزایش دبی جریان بر شکل‌گیری زودتر جریان ثانویه و در نتیجه موقعیت فرسایش جداره خارجی قوس شماره ۲ نقش داشته است.



الف



ب

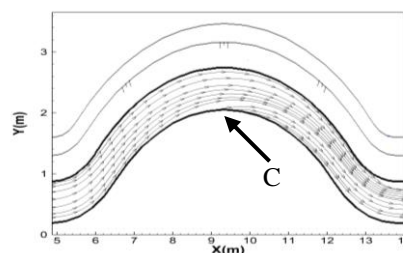


ج

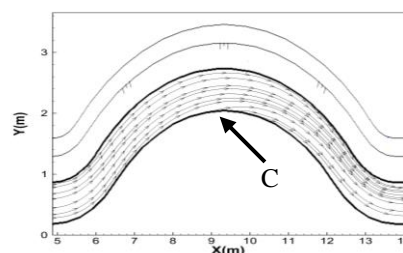
شکل ۷- فرسایش کناره در شرایط عدم حضور آبشکن، الف) دبی ۳۰، ب) دبی ۳۵ و ج) دبی ۴۰ لیتر در ثانیه

شکل ۷، فرسایش کناره در شرایط عدم حضور آبشکن در دبی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نقطه شروع فرسایش جداره خارجی قوس شماره ۲ در دبی ۴۰ زودتر از دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و در دبی ۳۵ زودتر از دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه صورت گرفته است. همچنین، نتایج نشان داد که میزان و شدت فرسایش جداره خارجی قوس شماره ۲ در دبی ۴۰ بیشتر از دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و در دبی ۳۵ بیشتر از دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه صورت گرفته است.

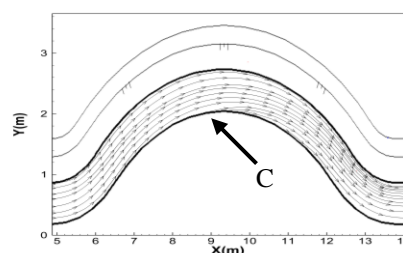
آنچه که در این قسمت حائز اهمیت است، موقعیت شروع فرسایش کناره خارجی قوس شماره ۲ می‌باشد.



الف



ب

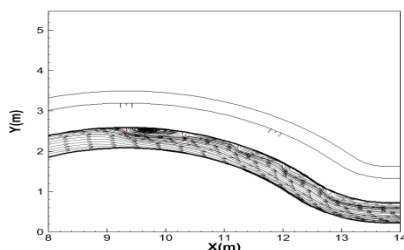


ج

شکل ۶- نمایش خطوط جریان در تراز نزدیک سطح آب، الف) دبی ۳۰، ب) دبی ۳۵ و ج) دبی ۴۰ لیتر در ثانیه

بررسی نتایج مدل آزمایشگاهی نشان داد که موقعیت شروع فرسایش، به موقعیت یا محل شروع انحراف خطوط جریان سطحی از جداره داخلی به سمت جداره خارجی و دبی جریان بستگی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده در قوس شماره ۲، محل شروع اولین خط جریان انحراف یافته در سطح آب (نقطه C) در دبی ۴۰ زودتر از دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و در دبی ۳۵ زودتر از دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه صورت گرفته است. به طوری که موقعیت شروع انحراف اولین خط جریان سطح آب در جداره داخلی ۸- درجه (نسبت به محور مرکزی) برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه، ۵- درجه برای دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و ۲- درجه برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین، با تلفیق نتایج





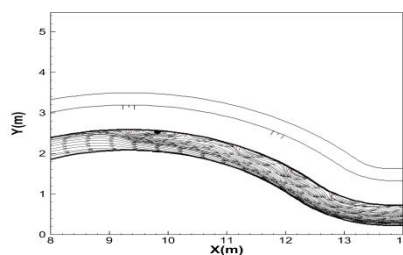
ج

شکل ۸- نمایش خطوط جریان در تراز نزدیک بستر، الف) دبی ۳۰، ب) دبی ۳۵ و ج) دبی ۴۰ لیتر در ثانیه

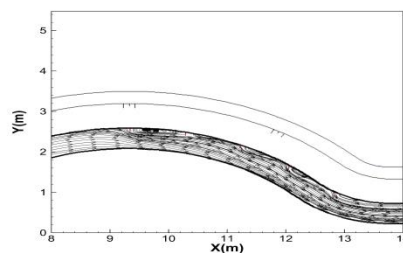
در شکل ۹، خطوط جریان در تراز میانی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بین آبشکن‌ها گردابه‌ای افقی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در اثر جریان بازگشتی تشکیل شده است. این گردابه‌های تشکیل شده نظیر دیواره‌ای عمل می‌کنند که مانع ورود جریان اصلی کانال به داخل محدوده بین آبشکن‌ها می‌شود. همان‌طور که در بررسی نتایج آزمایش بدون حضور آبشکن به آن اشاره شد، خطوط جریان در تراز میانی قوس شماره ۲ انحراف محسوسی را به سمت جداره داخلی و یا خارجی نداشته، به تبعیت از انحنای کانال، مسیر خود را طی می‌کنند. لذا، با قرار دادن آبشکن‌ها انحراف قابل توجهی در خطوط جریان در تراز میانی صورت نگرفته، از آبشکن سوم تا آبشکن پنجم، جریان اصلی کانال با مقاومت کمتر گردابه موجود بین دو آبشکن مواجه بوده، به سمت جداره خارجی حرکت می‌کند. بر اساس خطوط جریان ترسیم شده مشخص شد که با حرکت جریان از اولین آبشکن به سمت آخرین آبشکن، ابعاد گردابه‌های بین دو آبشکن متوالی کوچک‌تر شده و شرایط برای ورود جریان به داخل آبشکن‌ها و برخورد مستقیم آن‌ها به جداره قوس خارجی فراهم می‌شود. رخداد چنین شرایطی موجب شکل‌گیری فرایند فرسایش در جداره خارجی قوس خواهد شد. اما از آنجا که در نتیجه وجود آبشکن‌ها، سرعت‌های بیشینه به سمت جداره داخلی قوس منحرف شده‌اند. بنابراین، جریان‌های نزدیک به جداره خارجی قوس از سرعت کمتر و در نتیجه از قدرت فرسایشی کمتری نسبت به حالت آزمایش شاهد برخوردارند.

به‌عبارتی، میزان و شدت فرسایش به قدرت جریان ثانویه و دبی جریان بستگی دارد.

**بررسی الگوی جریان در قوس با حضور آبشکن ها:** به دلیل تنگ‌شدگی ناشی از احداث آبشکن و عرض زیاد ناحیه جدایی جریان در جلوی آبشکن، سرعت بیشینه به جداره داخلی قوس و جلوی آبشکن متمایل می‌شود. در شکل ۸، در تراز نزدیک بستر در محدوده بالادست آبشکن اول، ناحیه جدایی جریان به علت وجود آبشکن در مقابل جریان و به دنبال آن کاهش سرعت جریان، بلافاصله در بالادست آبشکن اول و افزایش سرعت در جلوی بال آبشکن وجود دارد. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، گردابه‌ای در بین آبشکن اول و دوم تشکیل شده، که ابعاد این گردابه با افزایش دبی جریان بزرگ‌تر شده است. با بررسی اثر تنگ‌شدگی به ازای دبی‌های مختلف بر الگوی جریان در تراز نزدیک بستر مشاهده می‌شود که در اثر افزایش دبی جریان، عرض ناحیه جدایی جریان بستر زودتر به جداره داخلی قوس شماره ۲ متمایل می‌شوند. در نزدیکی بستر به علت تمایل جریان به جداره داخلی، جریان کمتری وارد میدان آبشکن‌ها شده و لذا، در مقایسه با تراز میانی و تراز نزدیک سطح آب گردابه‌های قابل توجهی در بین آبشکن‌ها تشکیل نشده است.

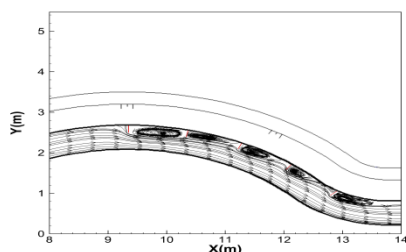


الف

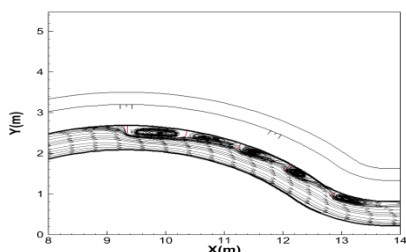


ب

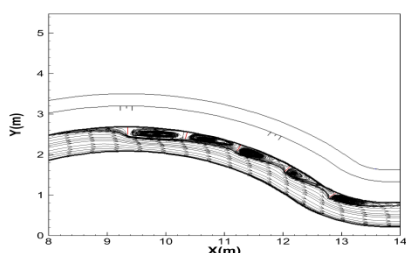
افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، برای یک عدد فرود ثابت، در شرایط عدم حضور آبشکن‌ها در محدوده زاویه بین ۳۷/۵ تا ۵۰ درجه بیشترین مقدار عقب‌نشینی کناره رخ داده است.



الف



ب



ج

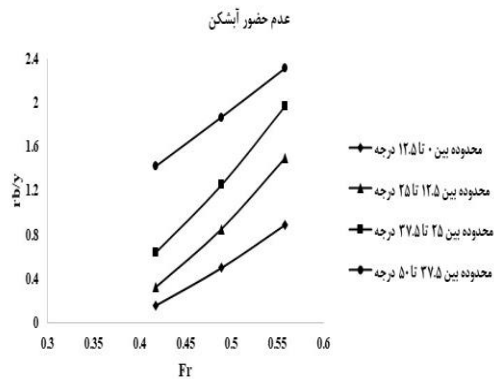
شکل ۹- نمایش خطوط جریان در تراز میانی، الف) دبی ۳۰، ب) دبی ۳۵ و ج) دبی ۴۰ لیتر در ثانیه

همچنین، شکل ۱۲ نشان می‌دهد که برای یک عدد فرود ثابت در شرایط حضور آبشکن‌ها در محدوده بین آبشکن چهارم و پنجم بیشترین مقدار عقب‌نشینی کناره اتفاق می‌افتد. به عبارتی، با حرکت جریان به سمت پایین‌دست قوس بر میزان فرسایش و عقب‌نشینی کناره افزوده می‌شود. علت این امر را می‌توان اثر نیروی گریز از مرکز بر جریان دانست که موجب شکل‌گیری جریان عرضی قوی می‌شود که ترکیب آن با جریان طولی باعث شکل‌گیری جریان حلزونی می‌شود. به طوری که هرچه به سمت

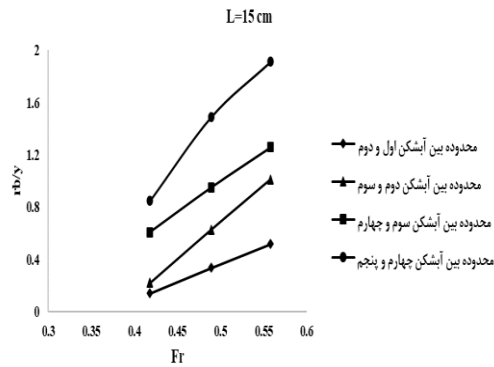
در شکل ۱۰، خطوط جریان در تراز نزدیک سطح آب در دبی‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، در تراز نزدیک سطح آب، با افزایش دبی، طول ناحیه جدایی جریان در بالادست در فاصله کمتری از بالادست آبشکن اول رخ می‌دهد. بررسی نتایج نشان داد که در محدوده آبشکن اول و دوم و همچنین آبشکن دوم و سوم، طول گردابه، کامل و به اندازه فاصله بین دو آبشکن است. با حرکت جریان از بالادست به سمت پایین دست در محدوده بین آبشکن سوم و چهارم و همچنین، چهارم و پنجم ابعاد گردابه‌ها کوچک‌تر شده، شرایط برای ورود جریان اصلی کانال به داخل محدوده دو آبشکن فراهم شده است. در فاصله بین آبشکن چهارم و پنجم علاوه بر وجود یک گردابه در پایین دست آبشکن چهارم، یک گردابه با ابعاد کوچک‌تر در بالادست آبشکن پنجم با گستره کمتری توسعه یافته است. این گردابه خود به عنوان مانعی در مقابل ورود جریان به فضای بین دو آبشکن عمل کرده، موجب کاهش بیشتر شدت فرسایش در محدوده بین آبشکن چهارم و پنجم نسبت به آبشکن سوم و چهارم شده است. با افزایش دبی جریان، ابعاد گردابه‌ها در تراز سطح آب و در محدوده بین تمامی آبشکن‌ها نسبت به دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه افزایش یافته است. علت این مسئله را می‌توان افزایش سرعت جریان عنوان کرده، که با افزایش سرعت طولی جریان و همچنین، اندرکنش جریان ثانویه و آبشکن‌ها، موجب ایجاد ناحیه جدایی جریان، هر چند ناچیز، در تمامی آبشکن‌ها شود و به عنوان مانعی در مقابل، ورود جریان اصلی کانال به محدوده بین دو آبشکن متوالی عمل نماید با دقت در شکل‌های ۸ تا ۱۱ مشاهده می‌شود که ابعاد گردابه‌ها با حرکت در عمق تغییر می‌کند. به این صورت که با حرکت به سمت سطح آب در یک دبی ثابت، به دلیل تمایل جریان به جداره خارجی، شیب‌دار بودن جداره قوس و افزایش سطح تماس طول آبشکن، ابعاد گردابه افزایش یافته است.

**تغییرات  $(\frac{r_b}{y})$  با عدد فرود ( $Fr$ ):** در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، تغییرات عقب‌نشینی نسبی نسبت به عدد فرود ملاحظه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود به علت افزایش سرعت جریان، در شرایط حضور و عدم حضور آبشکن‌ها میزان عقب‌نشینی کناره

نحوه عملکرد آبشکن‌ها، آزمایش‌ها ابتدا در حالت بدون حضور آبشکن در سه دبی مختلف انجام شد.



شکل ۱۱- تغییرات  $(\frac{v}{v_0})$  با عدد فرود ( $Fr$ ) در شرایط عدم حضور آبشکن‌ها



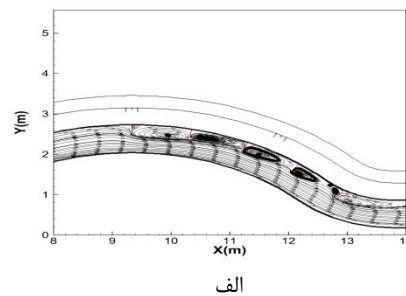
شکل ۱۲- تغییرات  $(\frac{v}{v_0})$  با عدد فرود ( $Fr$ ) در شرایط حضور آبشکن‌ها

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، شیب‌دار بودن جداره فرسایش‌پذیر کانال، بر الگوی جریان تاثیرگذار است که اهم نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است.

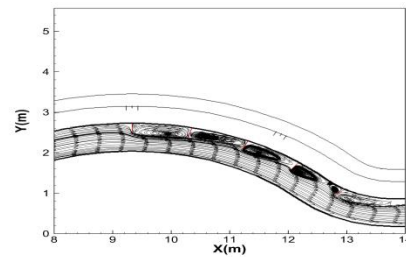
۱- با افزایش دبی جریان در شرایط عدم حضور آبشکن، موقعیت برخورد اولین خط جریان در تراز نزدیک بستر، به جداره داخلی قوس شماره ۲ نسبت به محور مرکزی قوس مذکور زودتر صورت گرفته است.

۲- با افزایش دبی جریان در شرایط عدم حضور آبشکن، موقعیت شروع اولین خط جریان در تراز نزدیک سطح آب از جداره داخلی قوس شماره ۲

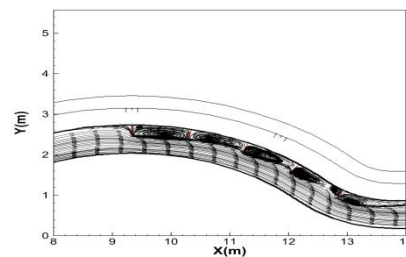
پایین دست قوس پیش می‌رود، جریان حلزونی، شکل کامل‌تری به خود می‌گیرد و موجب عقب‌نشینی و فرسایش بیشتر کناره می‌شود. در نهایت، بررسی نتایج نشان داد که عقب‌نشینی کناره در شرایط حضور آبشکن‌ها نسبت به عدم حضور آبشکن‌ها به طور متوسط حدود ۲۸ درصد کاهش یافته است. این مطلب، بیان‌گر این است که حضور آبشکن‌ها موجب کاهش عقب‌نشینی کناره می‌شود.



الف



ب



ج

شکل ۱۰- نمایش خطوط جریان در تراز نزدیک سطح آب، (الف) دبی ۳۰، (ب) دبی ۳۵ و (ج) دبی ۴۰ لیتر در ثانیه

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، الگوی جریان در شرایط حضور و عدم حضور آبشکن‌های سری ساده در کانال پیچان-رودی با جداره شیب‌دار فرسایش‌پذیر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. آبشکن‌ها به صورت سری در نیمه دوم قوس شماره ۲ و ۳ جانمایی شد. برای مقایسه

- نسبت به محور مرکزی قوس مذکور زودتر صورت گرفته است.
- ۳- در تراز نزدیک سطح آب در شرایط عدم حضور آبشکن، محل شروع اولین خط جریان انحراف یافته در سطح آب (نقطه C) در دبی ۴۰ زودتر از دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و در دبی ۳۵ زودتر از دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه صورت گرفته است.
- ۴- موقعیت شروع طرح اجرای حفاظت کناره‌های خارجی قوس، در نیمه دوم قوس شماره ۲ بستگی به میزان دبی جریان دارد، به طوری که با افزایش دبی جریان فاصله اجرای طرح حفاظت نسبت به محور مرکزی قوس مذکور کوتاه‌تر می‌شود.
- ۵- در تراز نزدیک بستر و در شرایط حضور آبشکن به علت تمایل جریان به جداره داخلی، جریان کمتری وارد میدان آبشکن‌ها شده، لذا، در مقایسه با تراز میانی و تراز نزدیک سطح آب گردابه‌های قابل توجهی در بین آبشکن‌ها تشکیل نشده است.
- ۶- در شرایط حضور آبشکن، ابعاد گردابه‌ها با حرکت در عمق تغییر می‌کند، به این صورت که با حرکت به سمت سطح آب در یک دبی ثابت، به دلیل تمایل جریان به جداره خارجی، شیب‌دار بودن جداره قوس و افزایش سطح تماس طول آبشکن، ابعاد گردابه افزایش یافته است.
- ۷- در تراز نزدیک سطح آب با افزایش دبی جریان، طول ناحیه جدایی جریان در بالادست در فاصله کمتری از بالادست آبشکن اول رخ داده است.
- ۸- در تراز میانی با حرکت جریان از اولین آبشکن به سمت آخرین آبشکن، ابعاد گردابه‌های بین دو آبشکن متوالی کوچک‌تر شده و شرایط برای ورود جریان به داخل آبشکن‌ها و برخورد مستقیم آن‌ها به جداره قوس خارجی فراهم می‌شود.
- ۹- با پیشروی جریان به سمت پایین دست میزان فرسایش و عقب نشینی کناره افزایش می‌یابد.

#### منابع مورد استفاده

- Abhari, M.N., M. Ghodsian, M. Vaghefi and N. Panahpur. 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21: 292-298.
- Acharya, A. and G.J. Duan. 2011. Three dimensional simulation of flow field around series of spur dikes. *World Environmental and Water Resources Congress. United States of America*, 2085-2094.
- Aezzi, S., M.J. Khanjani and M. Zounemat Kermani. 2018. Two dimensional simulation of flow pattern and bed changes in straight and meandering channels under the effect of spur dike. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 12(4): 970-981 (in Persian).
- Elyasi, S., A. Eghbalzade, M. Javan and M. Vaghefi. 2016. Effect of section constriction due to T-shaped spur dike in a bend on flow pattern using FLOW-3D software. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 6(9): 983-993 (in Persian).
- Ettema, R. and M. Muste. 2004. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flat bed channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(7): 635-646.
- Iranshahi, M., M. Ghodsian and M. Vaghefi. 2016. Flow field and scouring around series of triplex spur dikes in sharp bend. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(3): 1-12 (in Persian).
- Jamieson, E.C., C.D. Rennie and R.D. Townsend. 2013. 3D flow and sediment dynamics in a laboratory channel bend with and without stream barbs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139: 154-166.
- Keshavarzi, A.R., M. Valizadeh and J. Ball. 2010. Experimental study of the effects of submerged dikes on the energy and momentum coefficients in compound channel. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 2(11): 855-862.
- Kumar, T., D. Tyagi, L. Aggarwal and M. Kumar. 2018. Comparison of scour around different shapes of groynes in open channel. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 4(3): 382-392.
- Mousavi Naeni, S.A., M. Vaghefi and M. Ghodsian. 2010. Experimental investigation of relative radius on flow pattern around a T-shaped spur dike in 90 degree bend with rigid bed. *Bimonthly Journal of Water and Wastewater*, 23(1): 15-23 (in Persian).
- Nagata, N., T. Hosada and T. Nakato. 2005. Three dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12): 1074-1087.
- Sharma, K. and K.P. Mohapatra. 2012. Separation zone in flow past a spur dyke on rigid bed meandering channel. *Hydraulic Engineering*, 138(10): 897-901.

13. Vaghefi, M., M. Shakerdargah, A.R. Fiouz and M. Akbari. 2014a. Numerical investigation of the effect of Froude number on flow pattern around a single T-shaped spur dike in a bend channel. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3: 351-355.
14. Vaghefi, M., M. Shakerdargah and M. Akbari. 2014b. Numerical study on the effect of ratio among various amounts of submersion on three dimensional velocity components around T-shaped spur dike located in a 90 degree bend. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3: 675-679.
15. Vaghefi, M., M. Ghodsian and M. Akbari. 2017. Experimental investigation on 3D flow around a single T-shaped spur dike in a bend. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(3): 462-470.
16. Vaghefi, M., B. Faraji, M. Akbari and A. Eghbalzadeh. 2018. Numerical investigation of flow pattern around a T-shaped spur dike in the vicinity of attractive and repelling protective structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(2): 93-108.
17. Xiufang, Z., M. Pingyi and Y. Chengyu. 2012. Experimental study on flow turbulence distribution around a spur dike with different structure. *Procedia Engineering*, 28(5): 772-775.
18. Zare, M. and T. Honar. 2016. The effect of groyne on reduction of the scour depth around bridge piers in river bends. *Journal of Water and Soil Science*, 19(74): 167-192 (in Persian).
19. Zhang, H., H. Nakagawa, K. Kawaike and Y. Baba. 2009. Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dike. *International Journal of Sediment Research*, 24(1): 33-45.