مجله علمی- پژوهشی
دوره ۴، شماره ۱، بهار ۱۳۸۸

بررسی آزمایشگاهی اثر شعاع انحنا و موقعیت استقرار آبشکن‌های T شکل در قوس ۹۰ درجه بر میزان آبشستگی اطراف آنها

محمد واقفی[۱*]، مسعود قدسیان[۲]، سید علی اکبر صالحی نیشابوری[۳]

۱- استادیار سازه‌های هیدرولیکی گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
۲- استاد هیدرولیک، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استاد سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

*** بوشهر، دانشگاه خلیج فارس**
vaghefi@PGU.ac.ir

چکیده- آبشکن سازه‌ای هیدرولیکی است که برای حفاظت از سواحل رودخانه به‌کار می‌رود. تحلیل جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن‌های مستقر در قوس خارجی رودخانه‌ها به‌علت وجود جریانهای ثانویه و حلزونی، پیچیدگی زیادی دارد. در این مقاله به تأثیر موقعیت استقرار آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه بر میزان آبشستگی و تأثیر شعاع انحنای قوس بر تغییرات توپوگرافی بستر پرداخته شده است. برای این منظور از یک فلوم مستطیلی به عمق ۷۰ سانتیمتر و عرض ۶۰ سانتیمتر و با چند شعاع مرکزی متفاوت (R/B=2,3,4) استفاده شده است. کانال اصلی شامل مسیر مستقیم بالادست به طول ۷/۱ متر و مسیر مستقیم پایین‌دست به طول ۵/۲ متر است که یک قوس ۹۰ درجه این دو مسیر مستقیم را به هم متصل کرده است. دیوار و کف فلوم شیشه‌ای بوده و توسط قابهای فلزی پایدار شده است. طول کانال از رسوب با قطر متوسط ۱/۲۸ میلی‌متر و به عمق ۰/۳۵ متر پوشیده شده است. آزمایشها تحت جریان با دبی ثابت ۲۵ لیتر بر ثانیه انجام شده و نتایج بیانگر آن است که وقتی آبشکن در موقعیت ۷۵ درجه قرار می‌گیرد، آبشستگی حداکثر است. همچنین هرچه شعاع انحنای قوس بیشتر شود، میزان آبشستگی افزایش می‌یابد، اما از گسترش چاله آبشستگی در عرض کانال کاسته می‌شود.

کلید واژگان: آبشکن T شکل، الگوی آبشستگی، قوس، شعاع انحنای قوس.

۱- مقدمه

استفاده از آبشکن‌ها در تثبیت سواحل رودخانه‌ها یکی از راههای مؤثر در پایدارسازی ساحل است، اما وجود آبشکن در مسیر جریان، باعث ایجاد آبشستگی موضعی می‌شود. رسوب خروجی از اطراف آبشکن می‌تواند تأثیر زیادی بر توپوگرافی بستر رودخانه‌ها به‌ویژه در پایین‌دست محل استقرار آبشکن داشته باشد. در مسیرهای قوسی نیز به‌دلیل وجود جریانهای ثانویه و ترکیب آن با

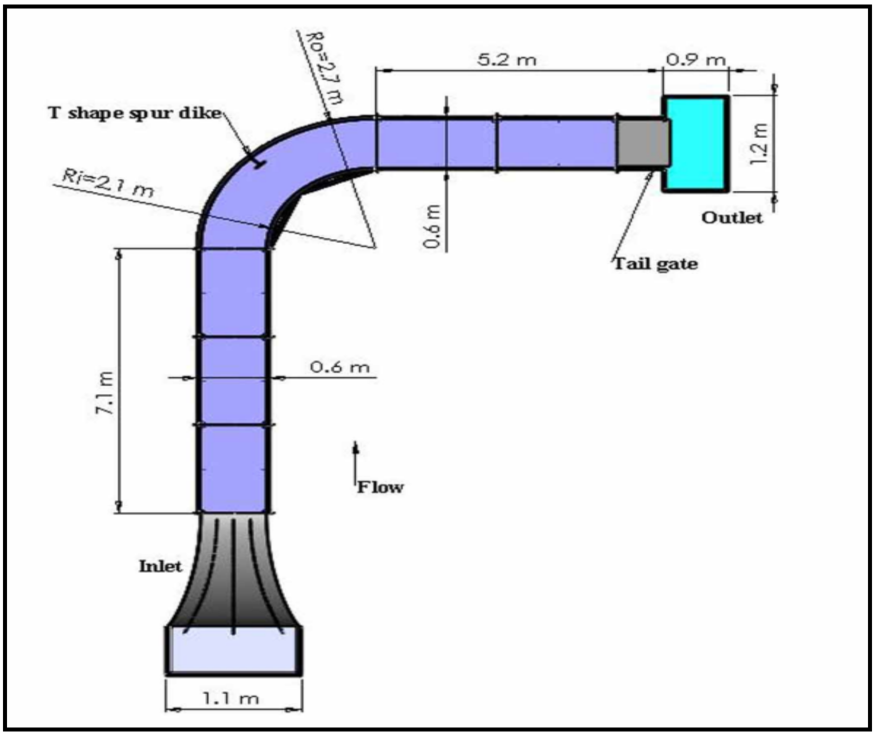
جریانهای طولی، جریانهای مارپیچی موسوم به جریان حلزونی تشکیل می‌شود. این جریانها باعث فرسایش شدید ساحل خارجی، به‌ویژه در سواحل فرسایش‌پذیر می‌شود. استقرار آبشکن‌ها در ساحل خارجی رودخانه‌ها می‌تواند در کاهش فرسایش پذیری کناره‌ها مؤثر باشد. هنگامی‌که از آبشکن‌ها برای محافظت جداره رودخانه در خم‌ها استفاده می‌شود، تحلیل جریان و آبشستگی در اطراف آبشکن‌های استفاده شده در قوس خارجی بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌شود که علت آن اندرکنش بین الگوی جریان در قوس و الگوی جریان اطراف آبشکن و تأثیر جریانهای حلزونی در قوس است.

مطالعات گذشته بیشتر بر روی آبشکن‌های مستقر در مسیرهای مستقیم متمرکز بوده و بیشتر به بررسی تغییرات آبشستگی بیشینه و هندسه چاله آبشستگی پرداخته شده است. در مورد قوس‌ها و کاربرد آبشکن درمحل قوس، تحقیقات زیادی انجام نشده و در مطالعات گذشته نیز توپوگرافی پایین‌دست قوس کمتر مدنظر محققان بوده است. اولین تحقیق در مورد به‌کارگیری آبشکن در قوس توسط Ahmad در سالهای ۱۹۵۱ و ۱۹۵۳ انجام شد. وی با تغییر پارامترهای دبی جریان، نسبت انقباض، شکل آبشکن، موقعیت استقرار در قوس، زاویه آبشکن و دانه‌بندی رسوب در کانال مستقیم و قوسی، به بررسی عمق بیشینۀ آبشستگی پرداخت. Gill در ۱۹۷۲ با تغییر شعاع انحنای قوس عمق جریان و قطر ذرات در کانال مستقیم و قوسی نشان داد که فاصله بین آبشکن‌ها، وابستگی زیادی به شعاع انحنای قوس دارد. Tingasnchali و Maheswaran در ۱۹۹۰ به اصلاح ضرایب مربوط در مدل عددی k-ε با توجه به انحنای خطوط جریان در قوس و در اطراف آبشکن پرداختند و نتیجه گرفتند که این ضریب تأثیر زیادی بر سرعت جریان دارد، در حالی که بر تنش برشی بیشینه در دماغه آبشکن تأثیر قابل توجهی ندارد. Mesbahi در ۱۹۹۲ قوس را به گونه‌ای تنظیم کرد که عرض جریان در جلوی آبشکن نسبت به حالت بدون آبشکن تغییری نکند و نتیجه گرفت که احداث آبشکن در قوس‌ها عمق چاله آبشستگی را عمیق‌تر می‌کند. Soliman و همکاران در ۱۹۹۷ به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر آبشکن بر مورفولوژی قوس‌های رودخانه نیل پرداختند و یک مدل دو بعدی را برای تأثیر آبشکن و مؤلفه‌های سرعت ارائه کردند. Giri و همکاران در ۲۰۰۴ به صورت آزمایشگاهی و عددی با اندازه‌گیری سرعت و تغییر دادن موقعیت آبشکن، به بررسی تأثیر آن بر میدان جریان در اطراف آبشکن بسته در کانال قوسی پرداختند. Fazli و همکاران در ۲۰۰۷ به بررسی آزمایشگاهی تأثیر موقعیت استقرار آبشکن‌های مستقیم در قوس ۹۰ درجه پرداختند. Forghani و همکاران در سال ۲۰۰۷ به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن‌های مستقیم و مستقر در قوس ۹۰ درجه اقدام کردند. قدسیان و همکاران در ۲۰۰۹ به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه پرداخته و سعی در برقراری نوعی ارتباط بین الگوی جریان و آبشستگی کردند. واقفی و همکاران در ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ به بررسی ابعاد چاله آبشستگی و تغییرات توپوگرافی بستر پیرامون آبشکن T شکل، تحت تأثیر تغییرات پارامترهایی نظیر طول آبشکن، طول بال آبشکن، شکل بال آبشکن و عدد فرود جریان پرداختند و روابطی مناسب را برای تأثیر این پارامترها بر میزان آبشستگی ارائه کردند. بررسی مطالعات گذشته، بیانگر کمبود تحقیقات در زمینۀ آبشکن‌های مستقر در قوس می‌باشد. در زمینۀ آبشستگی اطراف آبشکن T شکل در قوس نیز مطالعات

محدودی انجام شده و به بررسی یک یا چند پارامتر مؤثر بر الگوی جریان یا آبشستگی اکتفا شده است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر دو پارامتر مهم و تأثیرگذار موقعیت استقرار آبشکن T شکل و شعاع انحنای قوس، بر ابعاد چاله آبشستگی اطراف آن و تغییرات توپوگرافی بستر کانال در پایین‌دست آبشکن است.

۲- آزمایشها

آزمایشهای مورد نظر در کانالی با قوس ۹۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. شکل ۱ پلان و هندسه قوس مورد نظر را نشان می‌دهد. کانال نشان داده شده در شکل ۱ از یک قسمت مستقیم به طول ۷/۱ متر در بالادست و قسمت مستقیمی با طول ۵/۲ متر در پایین‌دست تشکیل می‌شود. این دو مسیر مستقیم در مرحله اول توسط قوس ۹۰ درجه‌ای با شعاع انحنای خارجی ۲/۷ متر (قوس ملایم) متصل شده‌اند. کانال از شیشه ساخته شده و توسط قاب‌هایی فولادی پایداری آن حفظ می‌شود. ارتفاع کانال برابر ۷۰ سانتی‌متر و عرض آن برابر ۶۰ سانتی‌متر است. کف کانال از رسوبهایی با قطر متوسط ۱/۲۸ میلی‌متر و انحراف معیار۱/۳ میلی‌متر پوشیده شده است. با تعویض قوس ملایم و استقرار قوس با شعاع انحنای خارجی برابر ۲/۱ متر (قوس متوسط) و ۱/۵ متر (قوس تند) به بررسی تأثیر شعاع انحنای قوس بر میزان آبشستگی پیرامون آبشکن‌های مستقر در موقعیت‌های مختلف پرداخته شده است. دبی جریان به وسیله یک روزنه کالیبره شده تنظیم شد. همچنین عمق جریان و پروفیل بستر با استفاده از دستگاه لیزری اندازه‌گیری پروفیل بستر با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.



شکل ۱ موقعیت و هندسه کانال

برای کنترل جریان از دریچه‌ای قطاعی -که در انتهای کانال نصب شده- استفاده شد. آبشکن‌ها به صورت صفحاتی مستطیلی با پلان T شکل و از جنس پلکسی گلاس ساخته شد.

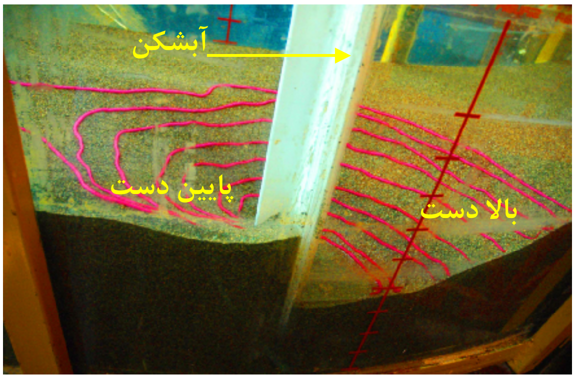
طول آبشکن‌ها برابر ۹ سانتی‌متر و طول بال آنها برابر ۹ سانتیمتر (۱۵ درصد عرض کانال) است. ضخامت آبشکن‌ها برابر ۱ سانتی‌متر و ارتفاع آنها برابر ۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به‌منظور تعیین اثر موقعیت استقرار آبشکن آزمایشهایی در چهار موقعیت متفاوت ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه‌ای در قوس خارجی هر سه قوس طراحی و اجرا شد. دبی جریان در تمامی آزمایشها ثابت و برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه بود. در تمامی آزمایشها شرایط آب تمیز حاکم بود. به‌منظور تعیین زمان تعادل، یک آزمایش ۱۲۰ ساعته برای آبشکن در موقعیت استقرار ۷۵ درجه انجام شد. زمان انجام هر آزمایش مدت زمان معادل ۰/۸۸ زمان رسیدن به عمق بیشینه آبشستگی در آزمایش زمان تعادل ۱۲۰ ساعته در نظر گرفته شد که برای هر آزمایش ۲۴ ساعت است. در این زمان میزان آبشستگی در فواصل زمانی ۴ ساعته کمتر از ۲ میلیمتر بوده است. فواصل مقاطع اندازه‌گیری توپوگرافی بستر از ۰/۵ درجه تا ۵ درجه متغیر است که این مقدار در نزدیکی آبشکن‌ها تحت شبکه‌بندی ریزتر قرار دارد. تعداد مقاطع عرضی برداشت شده در هر آزمایش بین ۶۰ تا ۸۰ مقطع و تعداد مقاطع طولی برابر ۶۰ مقطع بود.

۳- سازوکار الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن

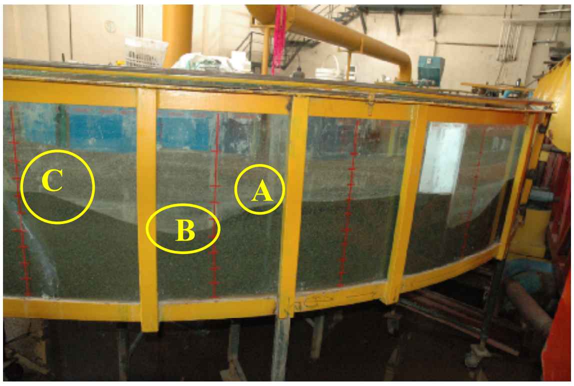
در ابتدای هر آزمایش جریانهای لایه‌های بالایی سطح آب به صورت جریان رو به پایین عمل می‌کنند و به علت اصطکاک کمتر با لایه‌های مجاور، زودتر از جریانهای لایه‌های پایین خود را به دماغه آبشکن T شکل می‌رسانند و تعدادی گردابهٔ عمودی که محور آنها عمود بر مسیر جریان آب است، تشکیل می‌شود و همزمان با آن نیز، گردابه‌های افقی ناشی از جریان لایه‌های پایین در محل تماس آبشکن با سطح بستر در بالادست و در داخل محدوده بال و جان آبشکن در جهت خلاف عقربه‌های ساعت تشکیل می‌شود. گردابه‌های قائم به جداسازی رسوبها از بستر می‌پردازند و گردابه‌های افقی رسوبهای جدا شده را به خارج از سطح چاله در حال تشکیل شدن پرتاب می‌کند. این گردابه‌ها عامل اصلی ایجاد آبشستگی در دماغه بالادست آبشکن است. در محل استقرار آبشکن به‌علت کاهش عرض مقطع جریان، سرعت جریان بیشتر می‌شود و این به مفهوم کاسته شدن فشار در فاصله بین بالادست آبشکن و مقطع جریان مقابل بال آبشکن است. این باعث می‌شود که در دماغه آبشکن تمرکز تنش ایجاد شده و آبشستگی از این ناحیه شروع شود و رسوبهای جداشده از بستر به سمت پایین‌دست حرکت کند. بر این اساس، بخش بزرگی از رسوبها (رسوبهای دسته اول) از نزدیکی دیوار خارجی بال آبشکن و بر روی شیب پایین‌دست آبشکن حرکت کرده و به سمت ساحل خارجی می‌روند. این رسوبها در فاصله حدود ناحیه اتصال مجدد جریان در لایه نزدیک بستر، به ساحل خارجی می‌رسند و مسیر حرکت آنها تقریباً بر مکان هندسی خط اتصال مجدد جریان منطبق است. پس از رسیدن به این منطقه از ساحل خارجی، و با ادامه حرکت رسوبهای پایین‌دست به این ناحیه، پشته رسوبی تشکیل شده و در ادامه در طول قوس و در نزدیکی ساحل خارجی (ناحیه A از شکل ۲- ب) توسعه می‌یابد. همچنین به دلیل ریزش جریان از روی پشته رسوبی ایجاد شده بر روی بستر اولیه و تشکیل گردابه‌های کوچک و

عمودی با محوری در جهت عرض کانال، در پایین دست این پشته رسوبی نیز آبشستگی به‌وقوع می‌پیوندد و باعث ایجاد چاله دوم آبشستگی (ناحیه B از شکل ۲- ب) می‌شود. البته رسوبهای با ارتفاع بیشتر از بستر اولیه -که به موازات چاله آبشستگی دوم و معمولاً در ساحل داخلی تشکیل می‌شوند- نیز به‌دلیل کاهش سطح مقطع جریان و افزایش سرعت جریان در تشکیل چاله آبشستگی دوم مؤثر است. در چاله دوم آبشستگی نیز مکانیزم حرکت رسوبات تقریبا مشابه با چاله اصلی آبشستگی می‌باشد و تا وقتی که نیروی ناشی از جریان و گردابه‌های ایجاد شده بر وزن ذره رسوبی غلبه پیدا کند، رسوبها از درون این چاله آبشستگی با نرخی شبیه به چاله آبشستگی اصلی و در طی زمان تعادل خارج می‌شود. در شکل ۲- ب تجمع رسوبهای خروجی از چاله آبشستگی دوم با حرف C نشان داده شده است. دسته دوم رسوبها بر روی شیب عرضی چاله آبشستگی و به‌صورت مورب به سمت ساحل داخلی حرکت می‌کند. این دسته از رسوبها -که به دلیل قویتر شدن مؤلفه سرعت عرضی در لایه‌های نزدیک بستر ناشی از جداشدگی جریان و در نتیجه جریان ثانویه قویتر (نسبت به قوس تنها) شکل می‌گیرد- باعث حرکت بخش بزرگی از رسوبها به سمت ساحل داخلی می‌شود. این رسوبها بسته به پارامترهای مختلف تأثیر گذار نظیر شعاع انحنای قوس، موقعیت استقرار آبشکن و غیره با زوایای مختلف نسبت به افق حرکت کرده و در فواصل مختلف نسبت به آبشکن به ساحل داخلی برخورد می‌کند و پس از رسیدن به ساحل داخلی، پشته رسوبی تشکیل می‌دهد و به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند (ناحیه D در شکل ۲- ج).

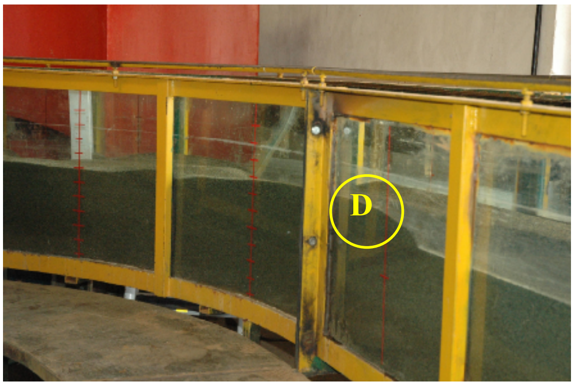
با توجه به سرعت کمتر حرکت رسوبها در این مسیر و ناشی از برخورد با ساحل داخلی، ارتفاع رسوبها در ساحل داخلی بیشترین مقدار را دارد و در پایین‌دست آن نیز به‌دلیل وجود گردابه‌های ضعیف، چاله آبشستگی به صورت محسوس تشکیل نمی‌شود. قسمت دیگری از رسوبها (رسوبهای دسته سوم) در محدوده وسط کانال و ناشی از جریانهای ایجاد شده در جلوی بال آبشکن به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. این رسوبها در طی مسیر خود در پایین‌دست آبشکن و در طول قوس، سازوکاری مانند رسوبهای دسته اول دارند، با این تفاوت که در ابتدای آزمایش به‌دلیل سرعت بیشتر حرکت آنها (در مسیر جریان اصلی کانال بودن)، پشته رسوبی و چاله آبشستگی پایین‌دست آن تشکیل نمی‌شود و جابه‌جایی رسوبها به‌صورت حرکت دیونها مشاهده می‌شود. پس از طی زمانی در حدود ۱۰ درصد زمان تعادل (برای آبشکن مستقر در نیمه اول قوس) و با کاهش نرخ حرکت رسوبها، تشکیل پشته رسوبی و چاله آبشستگی پایین‌دست آن آغاز می‌شود. با توسعه پشته رسوبی و چاله آبشستگی پایین‌دست آن به سمت انتهای قوس، از ارتفاع پشته رسوبی و عمق چاله آبشستگی دوم کاسته می‌شود. علت این پدیده آن است که با خروج جریان از قوس و ورود به مسیر مستقیم پایین‌دست، سطح آب پایین افتاده و گرادیان منفی فشار در خروجی کانال قوسی ایجاد می‌شود که به افزایش حرکت رسوبها منجر می‌شود و در نتیجه رسوبهای پشته رسوبی به درون چاله آبشستگی پایین‌دست خود ریخته و باعث کاهش عمق چاله آبشستگی دوم می‌شود، به‌طوری‌که در بعضی آزمایشها چاله آبشستگی دوم کاملا محو می‌شود. در شکل ۲- د پشته‌های رسوبی مشخص شده با حروف E و F در مسیر مستقیم بعد از قوس، مؤید این پدیده است.



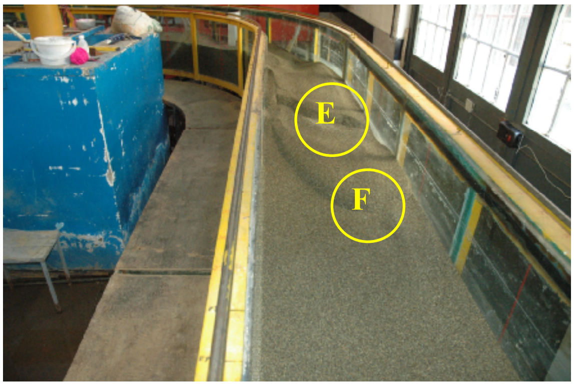
الف- چاله آبشستگی



ب- ساحل خارجی



ج- ساحل داخلی



د- مسیر مستقیم پایین دست

شکل ۲ نمونه‌ای از تغییرات توپوگرافی بستر پس از زمان تعادل برای آبشکن منفرد (L=*l*=0.2B) در موقعیت ۴۵ درجه از قوس ملایم

در شکل ۲-الف نیز چاله آبشستگی پیرامون آبشکن و خطوط همتراز بستر در پایان زمان تعادل و تأثیر شکل آبشکن (شکل T) برکاهش آبشستگی پایین‌دست مشاهده می‌شود.

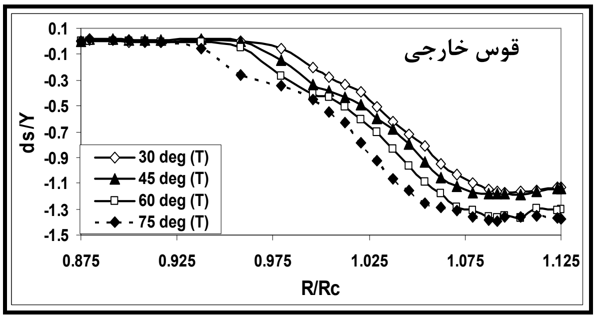
۴- نتایج

با تغییر موقعیت آبشکن به سمت پایین‌دست قوس، تنش‌های برشی بستر، به‌دلیل افزایش سرعت جریان بیشتر شده و همچنین به‌دلیل افزایش قدرت جریانهای عرضی ناشی از جداشدگی جریان بالادست آبشکن، ابعاد چاله آبشستگی و عمق آبشستگی بیشینه افزایش می‌یابد. به‌منظور تعیین تأثیر شعاع انحنای قوس و همچنین موقعیت استقرار آبشکن بر الگوی جریان و آبشستگی از سه شعاع انحنای مختلف (تند R=2B، متوسط R=3B و ملایم R=4B) استفاده شد. برای این منظور آبشکن در موقعیت‌های مختلف (۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه) این سه قوس مستقر شده و پروفیل بستر در پایان زمان تعادل برداشت شد. مشاهدات آزمایشهای انجام شده دلالت بر تأثیر عواملی نظیر جریان ورود از مسیر مستقیم بالادست و زاویه برخورد آنها با آبشکن مستقر در موقعیت‌های مختلف از سه قوس و تأثیر جریان در مسیر مستقیم پایین‌دست بر جریان پیرامون آبشکن و در نتیجه میزان آبشستگی دارد.

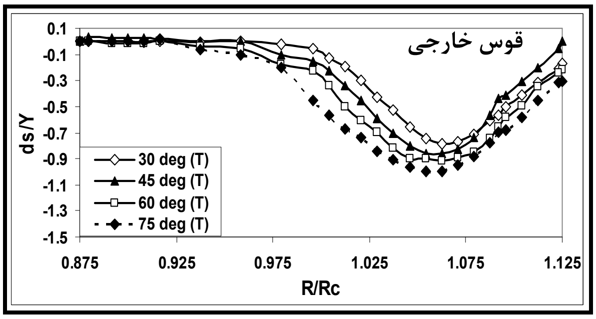
مشاهدات بیانگر افزایش زاویه برخورد خطوط جریان به آبشکن نسبت به افق با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به

سمت انتهای قوس است. این افزایش زاویه، دلالت بر وجود جریانهای عرضی قویتر داشته و یکی از دلایل افزایش ابعاد چاله آبشستگی با تغییر موقعیت آبشکن به سمت انتهای قوس (افزایش ۱۳، ۱۶ و ۲۰ درصدی در عمق آبشستگی حداکثر، طول چاله آبشستگی در بالادست و عرض چاله آبشستگی) است. این روند در دو قوس دیگر نیز با تغییر موقعیت آبشکن به سمت انتهای قوس مشاهده می‌شود و کاهش در میزان انحراف خطوط جریان، بیانگر کاهش قدرت جریانهای عرضی است که نتیجه آن، مشاهده کاهش نرخ در افزایش ابعاد چاله آبشستگی با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت انتهای قوس (افزایش ۷، ۱۰ و ۸ درصدی عمق آبشستگی حداکثر، طول چاله آبشستگی در بالادست و عرض چاله آبشستگی به در قوس تند) نسبت به آبشکن‌های مستقر در قوس ملایم است.

در شکل ۳ نمونه‌ای از تغییرات عرضی توپوگرافی بستر در مقطعی به فاصله ۰/۲۵ طول آبشکن در بالادست و پایین‌دست آبشکن‌های مستقر در موقعیت‌های مختلف از قوس ملایم نشان داده شده است. در این شکل R شعاع انحنای قوس، R_c شعاع مرکزی انحنای قوس، ds عمق آبشستگی موضعی در هر نقطه وY عمق جریان در ابتدای قوس است. این شکل بیانگر تشابه در شکل و هندسه چاله آبشستگی در مورد آبشکن‌های T شکل بوده و نشان می‌دهد که چاله آبشستگی، شیب عرضی تقریباً ثابتی در جهت قوس داخلی دارد. در بالادست آبشکن‌ها (شکل ۳- الف) با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت انتهای قوس، به‌دلیل افزایش مؤلفه عرضی سرعت و همچنین تغییر مکان هندسی سرعت حداکثر به سمت ساحل خارجی، ابعاد چاله آبشستگی گسترش یافته است. در پایین‌دست آبشکن نیز (شکل ۳- ب)، ضمن مشاهده اختلاف مشهود آبشستگی با مقطع بالادست آبشکن‌ها (شکل ۳- الف) به دلیل تأثیر شکل هندسی آبشکن (T شکل) در موقعیت مشابه، افزایش آبشستگی با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت انتهای قوس مشاهده می‌شود که دلیل آن، کاهش رسوبهای دسته اول (شرح داده شده در بخش سازوکار الگوی جریان و آبشستگی) است.



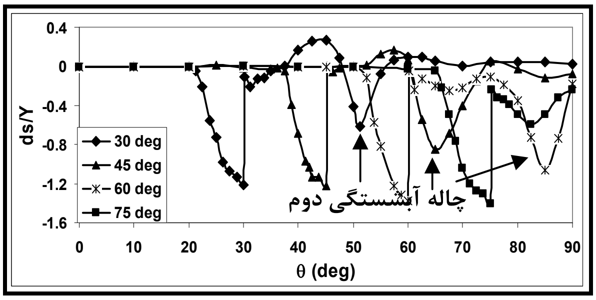
الف- بالادست



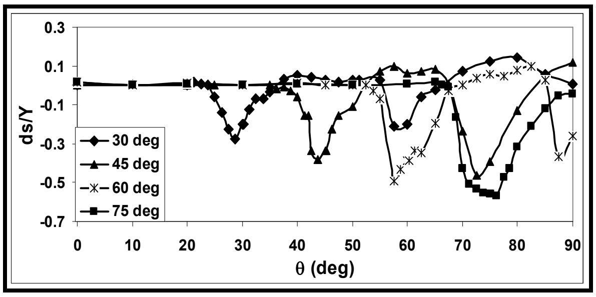
ب- پایین‌دست

شکل ۳ نمونه‌ای از مقاطع عرضی بدون بعد بستر به فاصله معادل ۰/۲۵ برابر طول آبشکن برای آبشکن مستقر در موقعیت‌های مختلف از قوس ملایم

در شکل ۴ نمونه‌ای از مقاطع طولی توپوگرافی بستر برای آبشکن مستقر در موقعیت‌های مختلف از قوس ملایم ارائه شده است. در مقطع به فاصله ۵ در صد عرض کانال از ساحل خارجی (شکل ۴- الف) چاله آبشستگی اصلی پیرامون آبشکن‌ها مشاهده می‌شود که حکایت از تشابه پروفیل طولی بستر در موقعیت‌های مختلف استقرار آبشکن در طول قوس دارد. در این شکل عدم آبشستگی در نزدیکی ساحل خارجی پایین‌دست برای آبشکن‌های مستقر در نیمهٔ اول قوس و آبشستگی اندک برای آبشکن‌های مستقر در نیمه دوم قوس مشهود است که دلیل آن، تغییر مکان هندسی سرعت‌های حداکثر به طرف ساحل خارجی در نیمه دوم قوس و افزایش تنش برشی است. در مقطع طولی عبوری از وسط کانال (شکل ۴- ب) نیز گسترش چاله آبشستگی به سمت ساحل داخلی با تغییر موقعیت آبشکن به سمت انتهای قوس به‌دلیل افزایش مؤلفه عرضی سرعت ناشی از افزایش زاویه برخورد جریان بالادست نسبت به افق به آبشکن مشهود است. ضمن اینکه گسترش چاله آبشستگی دوم در عرض کانال نیز در مورد آبشکن‌های مستقر در نیمهٔ اول قوس به دلیل وقوع آنها در طول قوس و عدم تأثیر مسیر مستقیم پایین دست بر حرکت متقارن رسوبات مشاهده می‌گردد. شکل ۵ نیز نمونه‌ای از مقاطع طولی توپوگرافی بستر در فاصله ۵ و ۵۰ درصد عرض کانال از ساحل خارجی قوس تند است.

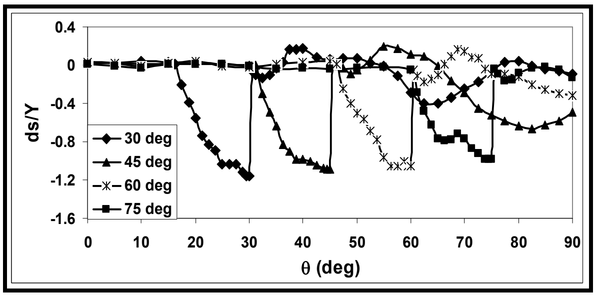


الف– فاصله ۵ درصد عرض کانال

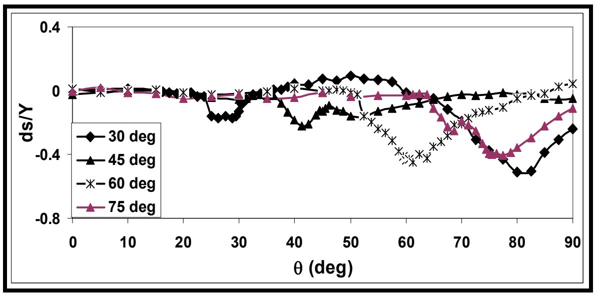


ب– فاصله ۵۰ درصد عرض کانال، از ساحل خارجی

شکل ۴ نمونه‌ای از مقاطع طولی بدون بعد توپوگرافی بستر برای آبشکن مستقر در موقعیت‌های مختلف از قوس ملایم



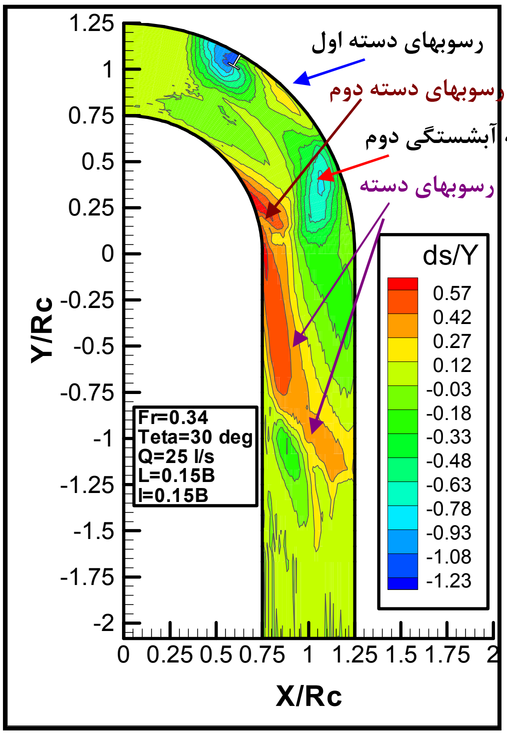
الف– فاصله ۵ درصد عرض کانال



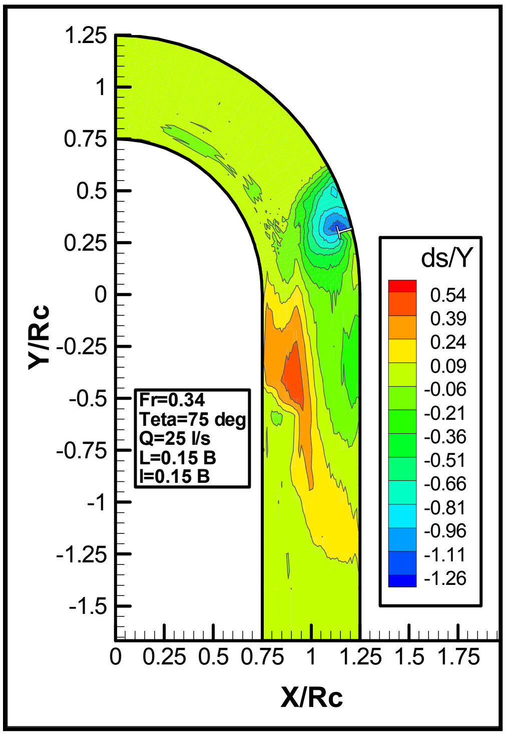
ب– فاصله ۵۰ درصد عرض کانال، از ساحل خارجی

شکل ۵ نمونه‌ای از مقاطع طولی بدون بعد توپوگرافی بستر برای آبشکن مستقر در موقعیت‌های مختلف از قوس تند

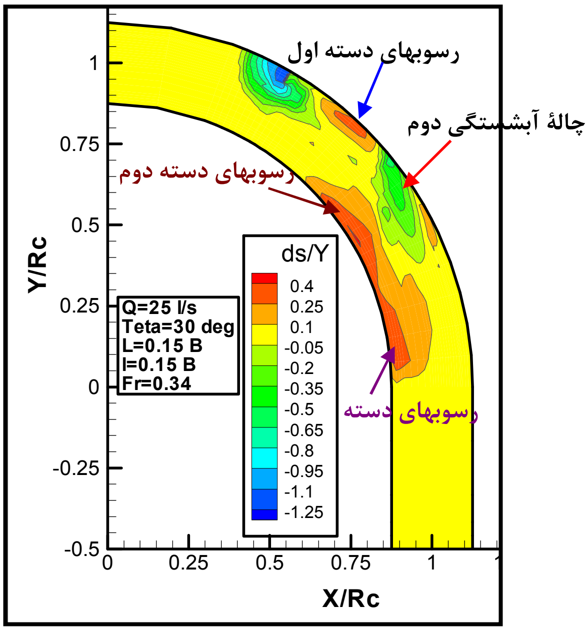
همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات مشابه قوس ملایم و با مقادیر کمتر آبشستگی ناشی از تأثیر شعاع انحنای قوس بوده که در ادامه دلایل آن ذکر می‌شود.
با نصب آبشکن در موقعیت‌های یکسان از سه قوس، قدرت جریان ثانویه در قوس ملایم، مقدار بیشتری نسبت به قوس تند دارد. دلیل این پدیده، افزایش بیشتر سطح آب در بالادست آبشکن در قوس تند نسبت به دو قوس دیگر و ناشی از انحنای شدید و نیز کاهش مؤلفه عرضی سرعت به‌دلیل برخورد مستقیم جریان از مسیر مستقیم بالادست قوس است. در قوس تند به‌دلیل طول کوچکتر قوس نسبت به قوس ملایم، قسمتی از خطوط جریان وارد شده از مسیر مستقیم بالادست، به ناحیه جداشدگی جریان پیرامون آبشکن برخورد می‌کند که این باعث کاهش مؤلفه عرضی سرعت و در نتیجه کاهش قدرت جریان ثانویه می‌شود. لازم است ذکر شود که پدیده یاد شده برای آبشکن‌های مستقر در نیمه اول قوس تند، مشهودتر است. حال با توجه به دلایل ذکر شده، میزان آبشستگی در قوس ملایم و در مقاطع مشابه از دو قوس دیگر، بیشتر است. همچنین شکل‌گیری مکان هندسی سرعت حداکثر در نزدیکی ساحل داخلی در قوس تند و تأثیر مضاعف آبشکن بر این موضوع نیز، برخی از مسائل حائز اهمیت است.
شکل ۶ نمونه‌ای از تغییرات توپوگرافی بستر را برای آبشکن‌های مستقر در ابتدا و انتهای دو قوس تند و ملایم نشان می‌دهد. در این شکل F_r عدد فرود جریان، Q دبی جریان، L طول آبشکن و l طول بال آبشکن است. بررسی اثر موقعیت آبشکن بر تغییرات توپوگرافی بستر بیانگر حرکت رسوبها در سه دسته ذکر شده در قوس ملایم (شکل‌های ۶- ج و ۶- د) است که با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت انتهای قوس، حرکت رسوبها به شکل متقارن‌تری در عرض کانال مشاهده می‌شود. ضمن این که چاله آبشستگی دوم نیز در آبشکن مستقر در موقعیت ۷۵ درجه به علت حرکت سریع‌تر رسوبهای دسته اول و ورود آنها به داخل چاله آبشستگی دوم با کاهش عمق همراه خواهد بود. این روند در مورد آبشکن‌های مستقر در قوس تند نیز با تغییر موقعیت آبشکن (شکل‌های ۶- الف و ۶- ب) مشاهده می‌شود. با استقرار آبشکن در هر یک از این قوس‌ها و با توجه به جریانهای پیچیده اطراف آبشکن و اندرکنش آنها با جریانهای موجود در قوس (بسته به شعاع انحنا) تغییراتی در الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن ایجاد می‌شود که باعث ایجاد تفاوت‌هایی در مقادیر آبشستگی و رسوبگذاری خواهد بود. نمونه‌ای از تغییرات پارامترهای چاله آبشستگی و توپوگرافی بستر در شکل ۷ ارائه شده است. در این شکل d_{m1} عمق حداکثر آبشستگی، θ موقعیت استقرار آبشکن، B عرض کانال، a عرض حداکثر چاله آبشستگی، d_{ss} عمق حداکثر چاله آبشستگی دوم و h ارتفاع حداکثر رسوبها است.
تغییرات عمق آبشستگی حداکثر (شکل ۷- الف) بیانگر افزایش این پارامتر با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت انتهای قوس بنا به دلایل ذکر شده است. در قوس تند و در حالت استقرار آبشکن در موقعیت ۴۵ درجه، حداکثر عمق آبشستگی، با کاهش نسبت به موقعیت ۳۰ درجه روبه‌رو شده که دلیل آن برخورد خطوط جریان از مسیر مستقیم بالادست به محدوده استقرار آبشکن (۴۰ تا ۵۰ درجه) نسبت به قوس ملایم (۲۵ تا ۳۰ درجه) است.



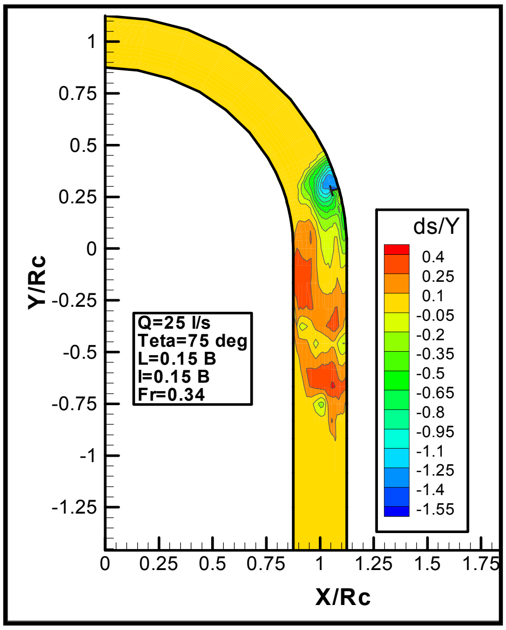
الف- قوس تند، موقعیت ۳۰ درجه



ب- قوس تند، موقعیت ۷۵ درجه



ج- قوس ملایم، موقعیت ۳۰ درجه



د- قوس ملایم، موقعیت ۷۵ درجه

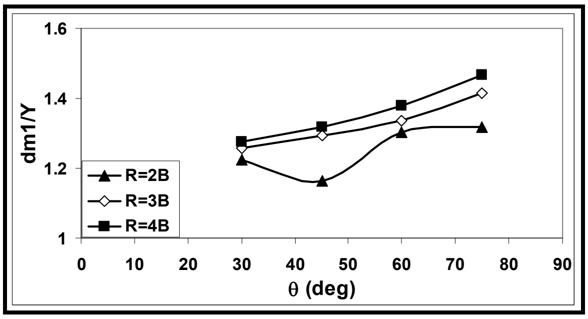
شکل ۶ نمونه‌ای از توپوگرافی بدون بعد بستر برای آبشکن مستقر در موقعیت ۳۰ و ۷۵ درجه

در این ناحیه مؤلفه سرعت عرضی به سمت ساحل خارجی و ناشی از جریان ورودی از مسیر مستقیم بالادست وجود داشته و در تقابل با جریانهای قوی عرضی خروجی از چاله آبشستگی و در لایه نزدیک بستر، از قدرت جریانهای عرضی کاسته شده و باعث کند شدن حرکت رسوبها، به‌خصوص دسته سوم رسوبها و سقوط مجدد بعضی از ذرات رسوب ناپایدار به سمت چاله آبشستگی می‌شود. این پدیده همان‌طور که مشاهده می‌شود، بر عمق حداکثر چاله آبشستگی نیز تأثیرگذار است.

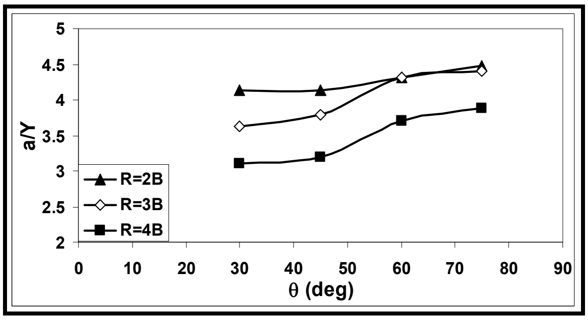
میزان پیشروی چاله آبشستگی در عرض کانال (شکل ۷- ب) نیز با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت انتهای قوس، به دلایل ذکر شده (افزایش تنش برشی و جریانهای عرضی) افزایش می‌یابد. در شکل ۷- ج نیز تغییرات عمق چاله آبشستگی دوم در موقعیت‌های مختلف بیانگر افزایش این عمق تا آبشکن مستقر در موقعیت ۶۰ درجه و سپس کاهش در موقعیت ۷۵ درجه در دو قوس ملایم و متوسط است. در صورتی که در قوس تند با تغییر موقعیت آبشکن به سمت انتهای قوس این پارامتر تغییرات نزولی را از خود نشان می‌دهد که دلیل آن، تمایل محدوده سرعت حداکثر و در نتیجه تنش برشی حداکثر به سمت قوس داخلی است و این مسأله باعث افزایش رسوبهای دسته سوم نسبت به دو دستهٔ دیگر در قوس تند و ورود قسمتی از این رسوبها به چاله آبشستگی دوم و کاهش رسوبهای دسته اول و در نتیجه کاهش قدرت ریزش جریان از روی رسوبهای دسته اوّل به سطح بستر اوّلیه (در تشکیل چاله آبشستگی دوم) می‌شود. همچنین محدوده سرعت حداکثر در قوس تند و تمایل آن به سمت قوس داخلی، باعث حرکت سریع‌تر رسوبهای دسته سوم به سمت پایین‌دست و کاهش شیب چاله آبشستگی به سمت قوس داخلی یا افزایش عرض حداکثر چاله آبشستگی (شکل ۷- ب) می‌شود. ضمن این که باعث افزایش ارتفاع رسوبهای حداکثر (شکل ۷- د) در نزدیکی ساحل داخلی در قوس تند نسبت به دو قوس دیگر می‌شود. روند تغییرات ارتفاع حداکثر رسوبها نیز با استقرار آبشکن تا نیمه قوس، صعودی و سپس نزولی (شکل ۷- د) بوده که دلیل آن تأثیر جریان در مسیر مستقیم پایین‌دست قوس بر حرکت رسوبها و توزیع متقارن آن در عرض کانال است.

شکل ۸ نمونه‌ای از تغییرات عرضی توپوگرافی بستر در مقطعی به فاصله ۰/۲۵ طول آبشکن در بالادست و پایین دست آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. روشن است که با افزایش شعاع انحنای قوس، عمق چالهٔ آبشستگی افزایش یافته است. در بالادست آبشکن مستقر در قوس تند و در نزدیکی ساحل خارجی، چاله آبشستگی به‌دلیل شکل‌گیری سرعت حداکثر در نزدیکی ساحل داخلی و از ابتدای قوس شکل کاسه‌ای (محدوده A) پیدا کرده است. همچنین در نزدیکی ساحل داخلی و در قوس تند، رسوبگذاری مشاهده می‌شود که این رسوبها ناشی از تأثیر مکان هندسی سرعت حداکثر در مجاورت ناحیه رسوبگذاری شده و حرکت عرضی قسمتی از رسوبهای دسته سوم به این سمت است.

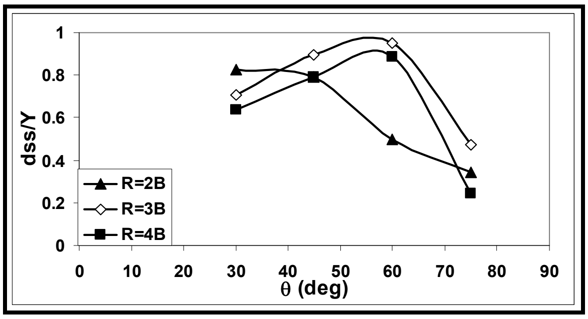
نکته جالب دیگر این است که در فاصله ساحل خارجی تا حدود محورکانال، میزان آبشستگی با افزایش شعاع انحنای قوس، افزایش می‌یابد و از آنجا تا حدود ۱۰ درصد عرض کانال، گسترش چاله آبشستگی با کاهش شعاع انحنای قوس (و به‌طور مشخص در قوس تند) مشهودتر است و در فاصله ۱۰ درصد عرض کانال تا نزدیک ساحل داخلی، با کاهش شعاع انحنای قوس رسوبگذاری مشاهده می‌شود. در واقع گسترش چالهٔ آبشستگی در عرض کانال برای قوس تند با دو شیب همراه است.



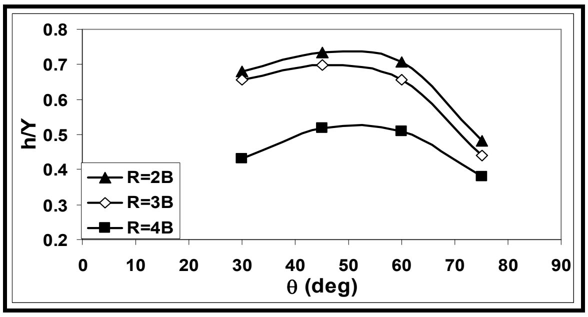
الف- عمق آبشستگی حداکثر



ب- عرض حداکثرچاله آبشستگی

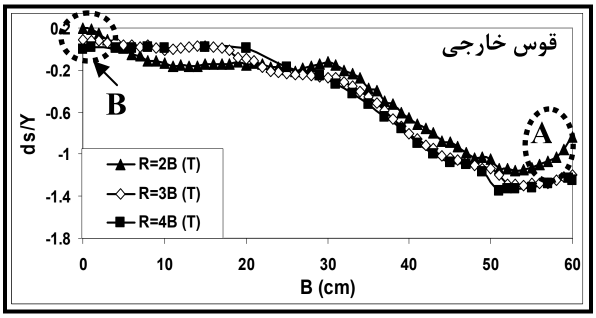


ج- عمق حداکثر چاله آبشستگی دوم

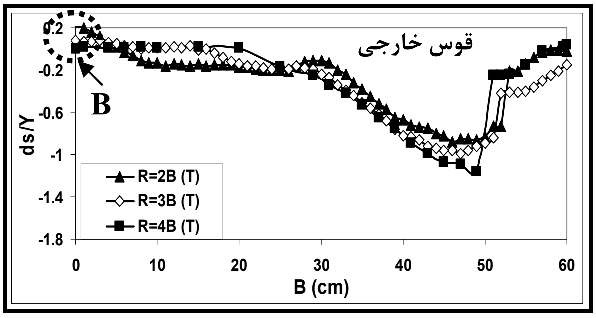


د- ارتفاع حداکثر رسوبها

شکل ۷ تغییرات بدون بعد پارامترهای توپوگرافی بستر برای آبشکن‌های مستقر در قوس‌های با شعاع انحنای متفاوت در برابر موقعیت استقرار آبشکن (عدد فرود ۰/۳۴)



الف- بالادست



ب- پایین‌دست

شکل ۸ نمونه‌ای از مقاطع عرضی بستر به فاصله معادل۰/۳۵ برابر طول آبشکن برای آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه از قوس‌های ملایم، متوسط و تند

در شکل ۹ نمونه‌ای از مقاطع طولی برای آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه از سه قوس ارائه شده که بیانگر افزایش آبشستگی حداکثر در قوس ملایم نسبت به دو قوس دیگر (شکل(۹- الف)) است در حالیکه شکل (۹- ب) بیانگر گسترش بیشتر چاله آبشستگی به سمت پایین‌دست با کاهش شعاع انحنای قوس است. همچنین چاله آبشستگی دوم در قوس ملایم در فاصله بیشتری از آبشکن تشکیل شده، درحالی‌که در دو قوس دیگر، محل

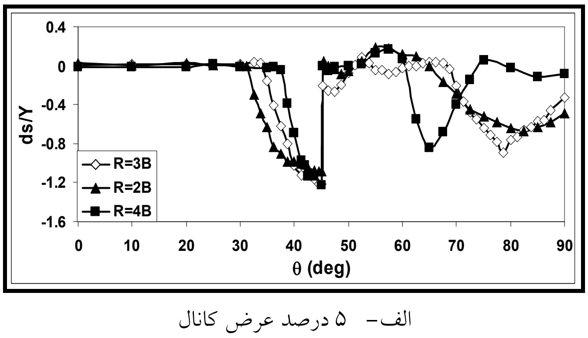
تشکیل آن به انتهای قوس نزدیک‌تر است (شکل ۹- الف)، که دلیل آن کوتاه بودن طول قوس است؛ ضمن اینکه گسترش چاله آبشستگی دوم به سمت ساحل داخلی در قوس ملایم (شکل ۹- ب) به دلیل نزدیکی بیشتر رسوبهای دسته اول و سوم در عرض کانال به یکدیگر و افزایش سرعت درلایه‌های نزدیک بستر و در پایین‌دست آنها بیشتر است. لازم است ذکر شود که با تغییر موقعیت استقرار آبشکن‌ها به سمت انتهای قوس، تغییرات ذکر شده برای سه قوس مشاهده می‌شود.

شعاع‌های انحنای متفاوت قوس و تغییرات ذکر شده ناشی از آن در الگوی جریان و آبشستگی باعث ایجاد تغییراتی در توپوگرافی بستر در پایان زمان تعادل می‌شود. شکل ۱۰ نمونه‌ای از تغییرات توپوگرافی بستر در پایان زمان تعادل و برای آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه و شکل ۱۱ تغییرات پارامترهای توپوگرافی بستر را نشان می‌دهد. لازم است ذکر شود که نمایه شکل ۱۰ بیانگر محدوده بین تراز بیشترین میزان آبشستگی و رسوبگذاری بی‌بعد شده با عمق جریان در بالادست قوس است.

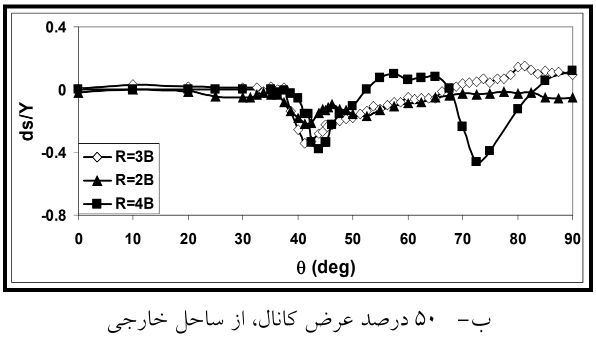
به‌عنوان مثال در شکل ۱۰- ج، عدد ۰/۵۵ نشان‌دهنده ارتفاع حداکثر رسوبگذاری در پایان زمان تعادل و عدد ۱/۴- نشان‌دهنده عمق حداکثر آبشستگی است. با افزایش شعاع انحنای قوس، افزایش در مقدار عمق آبشستگی حداکثر در تمامی موقعیت‌های استقرار آبشکن (شکل ۱۱- الف) دیده می‌شود (به‌جز مقدار حداقل این پارامتر در قوس تند و در موقعیت ۴۵ درجه که قبلا دلایل آن بیان شد).

با کاهش شعاع انحنای قوس، به‌دلیل نزدیکی مکان هندسی سرعت حداکثر به ساحل داخلی، از رسوبهای دسته اول و سوم کاسته شده (شکل ۱۰- الف) و به رسوبهای دسته دوم افزوده می‌شود. این پدیده با توجه به برخورد رسوبها به ساحل داخلی و کاهش نرخ حرکت آنها در پایین‌دست، افزایش ارتفاع رسوبگذاری را در پی دارد (شکل ۱۱- د). البته در حالت استقرار آبشکن در موقعیت ۷۵ درجه، به‌دلیل حرکت متقارن رسوبها در مسیر مستقیم پایین‌دست، کاهش چشمگیری در حداکثر ارتفاع رسوبها مشاهده می‌شود.

با کاهش شعاع انحنای قوس در نزدیکی ساحل داخلی و در جلوی بال آبشکن، به‌دلیل حرکت سریع تر رسوبهای دسته سوم، گسترش چاله آبشستگی به سمت ساحل داخلی به‌طور محسوس بیشتر است (شکل ۱۰- الف). مقایسه مقادیر حداکثر عرض چاله آبشستگی در شکل ۱۱- ب نیز بر این موضوع دلالت دارد.

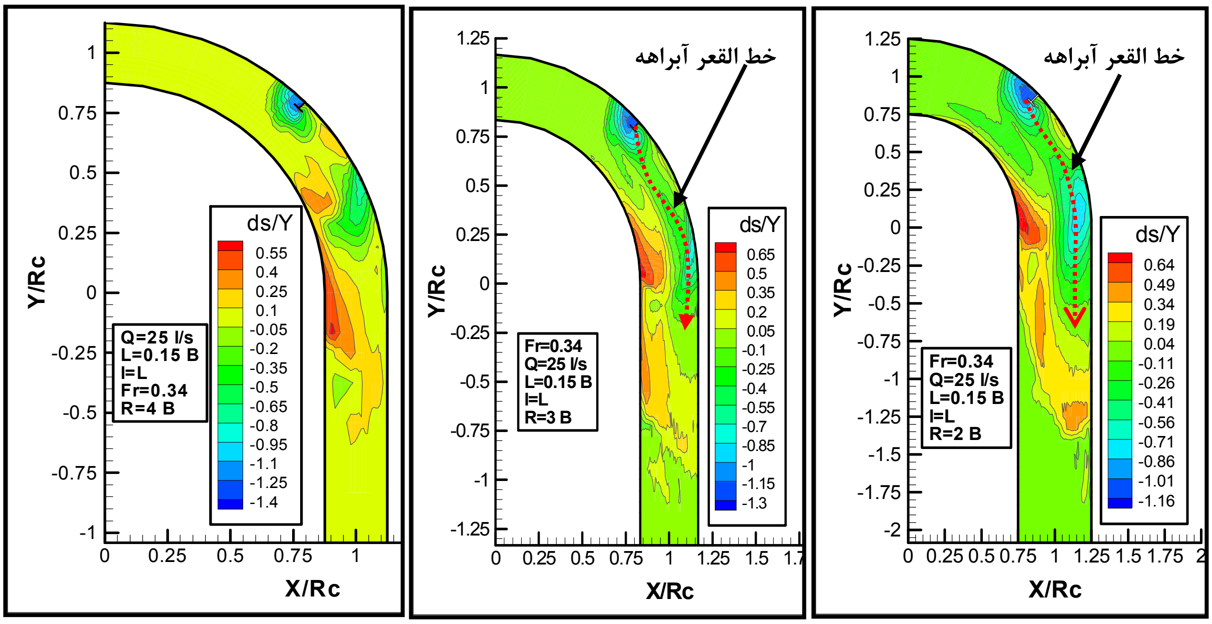


الف- ۵ درصد عرض کانال



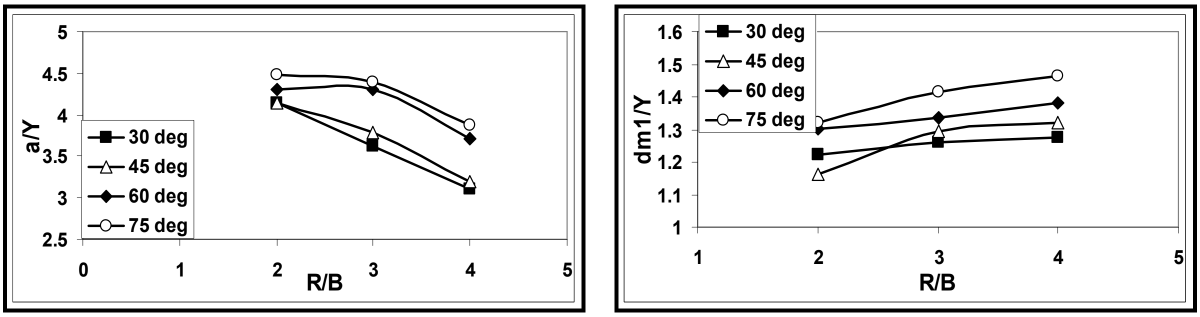
ب- ۵۰ درصد عرض کانال، از ساحل خارجی

شکل ۹ نمونه‌ای از مقاطع طولی بدون بعد توپوگرافی بستر برای آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه در سه قوس تند، متوسط و ملایم

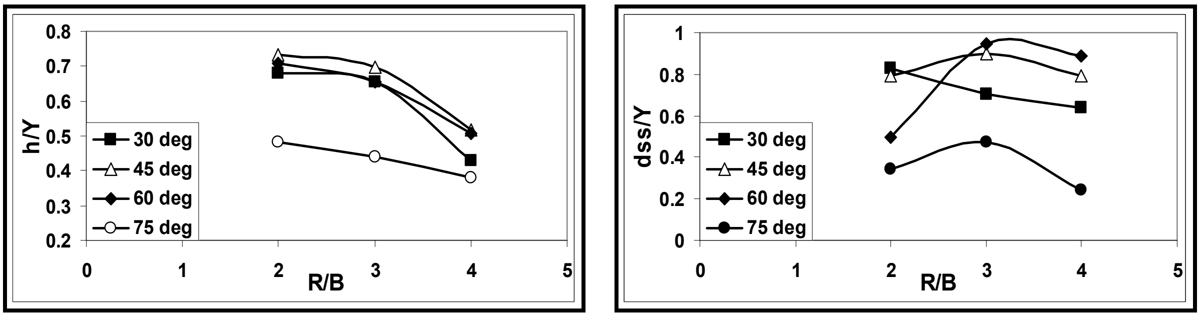


الف– قوس تند ب– قوس متوسط ج– قوس ملایم

شکل ۱۰ توپوگرافی بستر برای آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه و برای قوس‌های مختلف



الف– حداکثر عمق آبشستگی ب– حداکثر عرض چاله آبشستگی



ج– عمق حداکثر چاله آبشستگی دوم د– حداکثر ارتفاع رسوبها

شکل ۱۱ تغییرات بدون بعد پارامترهای توپوگرافی بستر برای آبشکن مستقر در موقعیت‌های متفاوت در برابر شعاع انحنا (عدد فرود ۰/۳۴)

نکته جالب دیگر افزایش پیشروی چاله آبشستگی به سمت پایین‌دست با کاهش شعاع انحنای قوس است که دلیل آن افزایش سرعت جریان در نیمه دوم قوس تند در مقایسه با قوس ملایم است.

اندازه‌گیری تراز جریان، بر افزایش عمق آب در نیمه اول قوس تند نسبت به قوس ملایم ناشی از برخورد مستقیم جریان از مسیر مستقیم بالادست دلالت دارد (که در موقعیت استقرار آبشکن در زاویه ۴۵ درجه محسوس‌تر نیز هست). در نیمه دوم قوس تند، کاهش تراز جریان ناشی از تأثیر مسیر مستقیم پایین‌دست، محسوس‌تر از قوس ملایم است که استقرار آبشکن و تنگ‌شدگی ایجاد شده نیز بر کاهش تراز آب در پایین‌دست می‌افزاید. به همین دلیل، گرادیان منفی فشار در پایین‌دست آبشکن ایجاد می‌شود که به افزایش سرعت جریان و در نتیجه تنش برشی و بالاخره حرکت سریع‌تر رسوبها منجر می‌شود. در شکل ۱۰ نیز چاله‌های دوم آبشستگی ایجاد شده بر این موضوع دلالت دارند. همچنین این پدیده باعث پیدایش خط‌القعر آبراهه در دو قوس متوسط و تند می‌شود و هرچه شعاع انحنای قوس کمتر باشد تشکیل خط‌القعر مشهودتر است. همچنین هرچه محل تشکیل چاله آبشستگی دوم به انتهای قوس نزدیکتر باشد (به‌دلیل افزایش سرعت در انتهای قوس و همچنین تغییرات مکان هندسی سرعت حداکثر در قوس‌ها)، عمق چاله آبشستگی دوم بیشتر است. لازم است ذکر شود که در قوس ملایم خط‌القعر آبراهه تشکیل نمی‌شود که دلیل آن، عدم برخورد خطوط جریان از مسیر مستقیم بالادست به محدوده آبشکن و پایین‌دست آن نسبت به دو قوس دیگر است. همچنین هرچه میزان رسوبگذاری در اطراف و پایین دست چاله دوم زیادتر شود (به‌دلیل ریزش جریان از روی رسوبها به درون چاله) و میزان تنگ‌شدگی مقطع در بالادست آن بیشتر باشد (به‌دلیل افزایش سرعت)، چاله آبشستگی دوم عمیق‌تر می‌شود. ضمن این که در موقعیت استقرار آبشکن در زاویه ۷۵ درجه، به‌دلیل شروع تشکیل چاله دوم آبشستگی در مسیر مستقیم پایین‌دست (به‌دلیل حرکت سریع رسوبها و ریزش به درون چاله)، عمق چاله آبشستگی در پایان زمان تعادل کاهش می‌یابد. با توجه به عوامل ذکر شده در موقعیت‌های مختلف استقرار آبشکن و در شعاع‌های انحنای متفاوت، نمودار تغییرات آن در شکل ۱۱- ج نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تغییرات آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل و توپوگرافی بستر تحت تأثیر تغییر موقعیت استقرار آبشکن در طول قوس و همچنین تأثیر شعاع انحنای قوس پرداخته و نتایج زیر حاصل شد:

- سازوکار حرکت رسوبهای جداشده در بالادست آبشکن و ناشی از آبشستگی موضعی، بیانگر حرکت رسوبها در سه دسته اصلی است که با تغییر دو پارامتر موقعیت استقرار آبشکن و شعاع انحنای قوس تفاوت‌هایی در نحوه حرکت آنها و شکل‌گیری توپوگرافی در پایین‌دست آبشکن مشاهده می‌شود.
- با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت انتهای قوس زاویه برخورد خطوط جریان به آبشکن نسبت به افق افزایش می‌یابد و در نتیجه ابعاد چاله آبشستگی و حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.
- اختلاف آشکار در میزان آبشستگی در مقاطع بالادست و پایین‌دست آبشکن بیانگر تأثیر هندسه آبشکن در کاهش رسوبگذاری به‌خصوص در پایین‌دست آبشکن‌ها است.
- بررسی پروفیل‌های طولی بستر در موقعیت‌های مختلف استقرار آبشکن در طول قوس بیانگر عدم آبشستگی در

نزدیکی ساحل خارجی پایین‌دست برای آبشکن‌های مستقر در نیمه اول قوس و آبشستگی اندک برای آبشکن‌های مستقر در نیمه دوم قوس است.

- با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت انتهای قوس حرکت رسوبهای به صورت متقارن‌تر در عرض کانال مشاهده می‌شود. ضمن این که چاله آبشستگی دوم نیز در مورد آبشکن مستقر در موقعیت ۷۵ درجه با کاهش عمق همراه است. این روند در مورد آبشکن‌های مستقر در قوس تند نیز با تغییر موقعیت آبشکن به سمت انتهای قوس مشاهده می‌شود.

- محدوده سرعت حداکثر در قوس تند و تمایل آن به سمت قوس داخلی باعث حرکت سریع‌تر رسوبهای دسته سوم به سمت پایین دست، و کاهش شیب چاله آبشستگی به سمت قوس داخلی یا افزایش عرض حداکثر چاله می‌شود؛ ضمن این که باعث افزایش حداکثر ارتفاع رسوبها در نزدیکی ساحل داخلی در قوس تند نسبت به دو قوس دیگر می‌شود. روند تغییرات ارتفاع حداکثر رسوبها نیز با استقرار آبشکن تا نیمه قوس صعودی و سپس نزولی بوده که دلیل آن تأثیر جریان در مسیر مستقیم پایین‌دست قوس بر حرکت رسوبها و توزیع متقارن آن در عرض کانال است.

- در فاصله ساحل خارجی تا حدود محورکانال میزان آبشستگی با افزایش شعاع انحنای قوس، افزایش می‌یابد و از آنجا تا حدود ۱۰ درصد عرض کانال، گسترش چاله آبشستگی با کاهش شعاع انحنای قوس (و به‌طور مشخص در قوس تند) مشهودتر است. در فاصله ۱۰ درصد عرض کانال تا نزدیک ساحل داخلی، با کاهش شعاع انحنای قوس، رسوبگذاری مشاهده می‌شود. گسترش چاله آبشستگی در عرض کانال برای قوس تند با دو شیب همراه است.

- با کاهش شعاع انحنای قوس، پیشروی چاله آبشستگی به سمت پایین‌دست افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سرعت جریان درنیمه دوم قوس تند در مقایسه با قوس ملایم است.

۶- فهرست علایم

عمق آبشستگی در هر نقطه	ds
عمق جریان در ابتدای قوس	Y
شعاع انحنای قوس در هر نقطه از عرض کانال	R
شعاع انحنای قوس در مرکز کانال	Rc
موقعیت استقرار آبشکن	θ
عدد فرود جریان	Fr
دبی جریان	Q
طول آبشکن	L
طول بال آبشکن	l
عرض کانال	B
عرض حداکثر چاله آبشستگی	a
ارتفاع حداکثر رسوبهای پایین‌دست	h
عمق حداکثر آبشستگی پیرامون آبشکن	dm_l
عمق حداکثر آبشستگی چاله آبشستگی دوم	d_{ss}

۷- منابع

Ahmad, M. (1953). Experiments on design and behavior of spur dikes, Proc. of IAHR Cong., p. 145.

Ahmad, M. (1951). Spacing and protection of spurs for bank protection. Civil Engineering and Publication Review, pp. 3-7.

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, pp. 301-309.

Gill, M. A. (1972). Erosion of sand beds around spur dikes. Journal of Hydraulic Division, Vol. 98, No. Hy9, pp. 1587-1602.

Mesbahi, J. (1992). On combined scour near groynes in river bends. M.Sc. Thesis., Delft University, Hydraulic Report HH 132.

Soliman, M. M., Attia, K. M., Kotb, Talaat A. M. and Ahmed A. F. (1997). Spur dike effects on the river Nile morphology after high Aswan dam, IAHR Congress, pp. 125-146

Tingsanchali, T.and Maheswaran, S. (1990). 2-D depth-averaged flow computation near groin, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, V. 116, N.1, pp. 71-86.

Fazli, M., Ghodsian, M. and Salehi, S.A.A. (2007). Experimental investigation on scour around spur dikes located at different position in a 90^0 bend. 32nd Congress of IAHR, Venice, Italy.

Forghani M. J., Fazli, M. and Ghodsian, M. (2007). Experimental study on flow field and scouring around a spur dike in ninety degree bend, 32nd Congress of IAHR, Venice, Italy.

Ghodsian M., Vaghefi M. and Salehi S.A. (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.

واقفی، م.، قدسیان، م. و صالحی نیشابوری، ع.ا. (۱۳۸۷). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل منفرد مستقر در قوس ۹۰ درجه" مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال چهارم، شماره ۳، ص.ص. ۵۷-۶۹.

واقفی، م.، قدسیان، م. و صالحی نیشابوری، ع.ا. (۱۳۸۷). "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر هندسه بال آبشکن‌های T شکل مستقردر قوس °۹۰ بر میزان آبشستگی اطراف آنها"، هفتمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.

واقفی، م.، قدسیان، م. و صالحی نیشابوری، ع.ا. (۱۳۸۸). "مطالعه آزمایشگاهی اثرعدد فرود جریان بر الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن‌های T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه"، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.