

# الگوی جریان و آبشستگی سری سه تایی آبشکن‌های سرسپری در قوس تند

مرضیه ایرانشاهی<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲\*</sup>، محمد واقفی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

ghods@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۶/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۳/۱۰]

**چکیده** - آبشکن‌های رودخانه‌ای، از سازه‌های مهم ساماندهی رودخانه به شمار می‌آیند که سبب انحراف جریان از کناره‌ها و نواحی بحرانی شده و جریان را به سمت محور مرکزی رودخانه هدایت می‌کنند. نتیجه‌ی انحراف جریان، توسعه یک ناحیه چرخشی با تلاطم شدید در پیرامون آبشکن است. فرایند هیدرولیکی این جریان، توسعه حفره آبشستگی پیرامون آبشکن و ته‌نشینی بار رسوبی در پایین‌دست و کناره رودخانه است. در حالی که آبشستگی یک خطر جدی برای سازه آبشکن و در نتیجه برای رودخانه محسوب می‌شود، ضرورت پژوهش در این زمینه را آشکار می‌سازد. در این مقاله سه آبشکن سرسپری دافع (رو به بالادست) با فاصله ۳/۵ برابر طول موثر آبشکن در قوس خارجی کانال ۹۰ درجه تند قرار گرفته‌اند و آبشکن اول در موقعیت ۳۰ درجه از قوس خارجی قرار دارد. نتایج حاصل از یک آزمایش میدان جریان در بستر هموار و آزمایش آبشستگی آن ارائه شده است. میدان جریان با استفاده از دستگاه سرعت سنج Vectrino II برداشت شده است. نتایج نشان داد میزان آبشستگی آبشکن دوم ۲۳٪ و آبشستگی آبشکن سوم ۸۱٪ بیشترین میزان آبشستگی است که در بالادست آبشکن اول رخ می‌دهد. در این مقاله الگوی جریان و سازوکار ایجاد آبشستگی و جریان‌هایی که در این محدوده به وقوع می‌پیوندند به تفصیل آمده است.

**واژگان کلیدی:** میدان جریان، آبشستگی، قوس تند، آبشکن دافع، سری آبشکن

## ۱- مقدمه

آبشکن‌ها سازه‌های متقاطع یا عرضی هستند که از دیواره طبیعی رودخانه با طول مناسب و با زاویه مناسبی نسبت به راستای عمومی جریان، توسعه یافته و سبب انحراف حمله جریان از کناره‌ها و نواحی بحرانی شده و جریان را به سمت محور مرکزی رودخانه هدایت می‌نمایند. ضمن آنکه هنگامی که از آبشکن‌ها برای محافظت جداره‌ی رودخانه در خم‌ها استفاده می‌شود، تحلیل جریان و آبشستگی در اطراف آبشکن‌های استفاده شده در قوس خارجی بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌شود. از جمله پژوهش‌هایی که تاکنون پیرامون آبشکن انجام شده به شرح زیر است: Halitigin و همکاران (۲۰۰۷) تاثیر توزیع فشار و سرعت دو آبشکن زاویه‌دار با نسبت تنگ شدگی (یعنی طول

تصویر شده دو آبشکن به عرض کانال) ۰/۲۵ را که در دو دیواره مقابل یکدیگر قرار داشتند، بررسی نمودند. ایشان مشاهده نمودند که فشار و سرعت در ناحیه بالادست آبشکن‌ها با افزایش زاویه آبشکن (از پایین دست اندازه‌گیری کرده است)، افزایش می‌یابد. Koken (2011) ساختار آشفته جریان پیرامون تک آبشکن در سه زاویه قرارگیری ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه با ثابت ماندن نسبت تنگ شدگی کانال را با مدلسازی عددی DES<sup>۱</sup> بررسی کرد و به منظور درستی آزمایشی آن از داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده به کمک ADV استفاده نمود. نتایج ایشان نشان داد که اندازه و راستای سیستم گردابه نعل اسبی با تغییر زاویه جریان ورودی به میزان قابل ملاحظه-

<sup>1</sup> Detached Eddy Simulation

حالت مستغرق و غیرمستغرق انجام دادند. Kuhnle و همکاران (۲۰۰۲) تاثیر سه زاویه قرارگیری آبشکن دوزنقه‌ای (۴۵ و ۹۰ و ۱۳۵) را بر حجم آبستگي در حالت آب زلال پیرامون تک آبشکن با ثابت نگه داشتن میزان تنگ شدگی کانال بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد کمینه میزان آبستگي در حالت ۹۰ درجه و بیشینه آن در حالت ۱۳۵ درجه (دافع) شکل می‌گیرد. کرمی و همکاران (۲۰۱۱) به منظور کاهش آبستگي پیرامون سری آبشکن‌ها، از یک آبشکن محافظ در بالادست آبشکن اول استفاده نمودند. هدف ایشان تخمین پارامترهای طراحی آن بود. به این منظور الگوی جریان را با استفاده از ADV 25Hz در بستر صلب زبر برداشت نمودند. نتایج ایشان مقدار پارامترهای بهینه طراحی برای آبشکن محافظ به صورت زاویه ۴۵ یا ۹۰ درجه و با طولی معادل ۰/۶ طول آبشکن‌های اصلی و با فاصله ۲ یا ۲/۵ برابر طول آبشکن‌های اصلی را بیان نمود. Li و همکاران (۲۰۰۶) تاثیر وجود یک دیواره موازی در بالادست کوله پل را به عنوان یک عامل کنترل فرسایش در دو حالت آب زلال و بستر فعال بررسی کردند. براساس یافته‌های ایشان با احداث دیواره موازی، چاله فرسایشی از دماغه بالادست کوله دور شده و به سمت میانه کانال منتقل می‌شود. علاوه بر آن از میزان بیشینه فرسایش موضعی نیز کاسته می‌شود. ایشان دریافتند با افزایش طول دیواره، میزان بیشینه فرسایش موضعی کاهش می‌یابد. قدسیان و واقفی (۲۰۰۹) میدان جریان و آبستگي را در کانال تغییرشکل یافته پیرامون آبشکن T شکل منفرد در قوس توسعه یافته بررسی کردند. واقفی و همکاران (۲۰۱۲) اثر پارامترهای مختلف را روی ابعاد چاله آبستگي آبشکن T شکل منفرد مستقر در قوس بررسی نمودند.

در این مقاله به منظور درک بیشتر ارتباط بین الگوی جریان و آبستگي، الگوی خطوط جریان و سازوکار ایجاد آبستگي پیرامون سه آبشکن سرسپری قرار گرفته در قوس تند و جریان‌هایی که در این محدوده به وقوع می‌پیوندند به تفصیل آمده است.

ای تغییر می‌نماید. در یک مدل عددی همراه با کار آزمایشگاهی، Oullon و Dartus (۱۹۹۷) نتیجه‌گیری کردند که بیشترین تنش برشی کف متناظر با بیشینه آبستگي است و در گوشه بالادستی دماغه آبشکن قرار دارد. ایشان توزیع فشار مجاور آبشکن را مورد توجه قرار دادند و مشاهده کردند پروفیل قائم فشار پیرامون آبشکن اغلب هیدرواستاتیک است؛ به جز در نواحی بسیار نزدیک به دماغه سازه. علاوه بر آن، فشار کل (فشار استاتیکی و دینامیکی) در بالادست آبشکن بیشتر از پایین دست سازه است که سبب می‌شود نیروی درگ خالص بر جریان اعمال شود. Kang & Hongkoo (2011) در یک مطالعه آزمایشگاهی، ویژگی‌های جریان را پیرامون آبشکن L شکل در حالیکه بازوی آن رو به بالادست باشد، بررسی نمودند. سرعت و تغییرات خط القعر (محل وقوع سرعت حداکثر) و ناحیه جدایی جریان در این پژوهش بررسی شد. تغییرات عدد فرود (۰/۲۱، ۰/۲۵، ۰/۳۳) تاثیری بر تغییر محل خط القعر و ناحیه جدایی جریان ندارد. Sukhodolov و همکاران (۲۰۰۴) براساس فاصله آبشکن‌ها، الگوی جریان گردابی بین آبشکن‌ها را دسته‌بندی کردند. در فواصل بسیار کم دو گرداب کوچک با چرخش عرضی داخل ناحیه آبشکن‌ها رخ می‌دهد. یکی از این گرداب‌ها با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها ناپدید می‌شود. در فواصل زیاد بین آبشکن‌ها، دو جریان گردابی با چرخش طولی داخل فضای بین آبشکن‌ها ایجاد می‌شود. مدل تصویری<sup>۱</sup> ارائه شده به وسیله‌ی Sukhodolov و همکاران، به وسیله اندازه‌گیری‌های سرعت در محدوده آبشکن‌ها به وسیله‌ی Weitbrecht و همکاران (2008) تایید شد. ایشان سرعت‌ها را با استفاده از تکنیک سرعت ذره (PIV)<sup>۲</sup> اندازه‌گیری کردند و نتیجه‌گیری کردند الگوی گرداب‌ها پارامتر غالب در کنترل تبادل جرم جریان بین جریان اصلی در رودخانه و جریان پیرامون آبشکن‌هاست. Yossef & Vriend (۲۰۱۱) آزمایش‌هایی در کانال با بستر صلب در حالتی که پنج آبشکن در یک طرف کانال قرار داده شده بودند، به منظور مطالعه دینامیک جریان و مقایسه آن در نزدیکی آبشکن‌ها در

1 conceptual  
2 particle image velocimetry

## ۲- آزمایش‌ها

فلوم مورد استفاده یک کانال ۹۰ درجه (L شکل) با مقطع مستطیلی است. این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۷/۱ متر در بالادست و قسمت مستقیمی به طول ۵/۲ متر در پایین دست تشکیل شده است و این دو مسیر مستقیم به وسیله قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنا خارجی ۱/۵ متر به یکدیگر متصل شده‌اند. کانال از جنس شیشه است و به وسیله قاب فولادی پایدار شده است. ارتفاع کانال ۷۰ سانتی‌متر و عرض آن ۶۰ سانتی‌متر است (شکل ۱). به طور شماتیک ابعاد کانال مورد نظر را در پلان نشان می‌دهد.

شکل ۱ شماتیک کانال مورد نظر

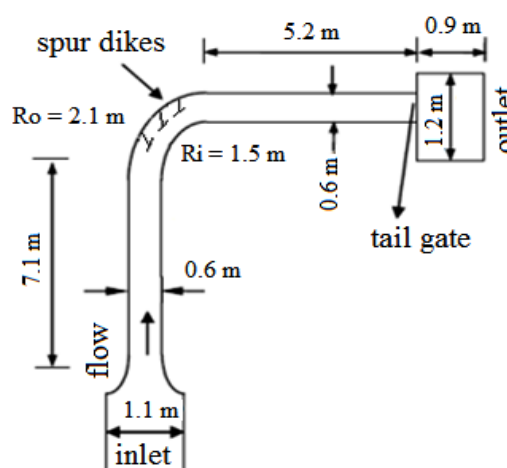


Figure 1. General view of experimental model

کانال استفاده شده مجهز به یک مخزن ورودی است که جریان را از طریق تبدیل افقی و قائم به داخل فلوم هدایت می‌کند. در انتهای مسیر مستقیم پایین دست قوس، به منظور تنظیم ارتفاع سطح آب، دریچه‌ای پروانه‌ای وجود دارد. در انتهای مسیر مستقیم و قبل از دریچه پروانه‌ای، یک دریچه کشویی به منظور بالا آوردن سطح آب از پایین دست در شروع آزمایش و زهکشی تدریجی کانال در انتهای آزمایش استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها دبی ثابت و برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه است. مصالح از ماسه طبیعی رودخانه و با دانه‌بندی یکنواخت است و قطر میانگین رسوبات استفاده شده ۱/۲۸ میلی‌متر و ضریب انحراف استاندارد آن برابر ۱/۳ و دانسیته

نسبی رسوبات ۲/۳۵ است. آبشکن‌های استفاده شده از جنس پلکسی گلاس است. در تمام آزمایش‌ها از سه آبشکن استفاده شده است که ارتفاع آنها ۶۰ سانتی‌متر با ضخامت ۱ سانتی‌متر است. طول تصویر شده کلیه آبشکن‌ها در صفحه عمود بر جریان (L: طول موثر) یکسان و برابر ۹ سانتی‌متر (۱۵٪ عرض کانال) است. این معیار تنگ‌شدگی براساس محدوده ارائه شده در نشریه ۵۱۶ و معیار Mellville (1992) برای آبشکن‌های کوتاه است. طول بال همه‌ی آبشکن‌ها نیز ۹ سانتی‌متر و برابر طول موثر آنها است و لبه آنها گرد شده است. زاویه بین بال و جان آبشکن‌ها ۶۰ درجه رو به بالادست است. زاویه انتخاب شده مطابق با محدوده ارائه شده در نشریه ۵۱۶ است و بال آبشکن به موازات دیواره کانال است. در آزمایش‌های انجام شده سه آبشکن با فاصله 3/5L از یکدیگر و در حالت دافع قرار گرفته‌اند. آبشکن اول در موقعیت ۳۰ درجه از قوس نصب شده است.

آزمایش آبشستگی در حالت آب زلال و در حالت آستانه حرکت (U/Uc = 0.98) انجام شده است که U سرعت جریان و Uc سرعت جریان در آستانه حرکت است عدد فرود در آزمایش‌ها برابر ۰/۳۲۸ و عدد رینولدز حدود ۴۱۶۴۰ است. در آزمایش آبشستگی برای برداشت بستر از یک متر لیزری استفاده شد. این دستگاه با ارسال لیزر روی سطح مورد نظر، فاصله انتهای دستگاه را تا نقطه مورد نظر می‌دهد. دقت آن برای سطوح عمود بر لیزر  $\pm 1$  میلی‌متر و برای سطوح غیر عمود تا  $\pm 1/5$  میلی‌متر است. پس از ۲۴ ساعت و اتمام زهکشی کانال تعداد ۳۲ مقطع عرضی و ۷۰ مقاطع طولی برداشت شده است. با در نظر گرفتن تعادل نسبی، زمان انجام آزمایش آبشستگی ۲۴ ساعت است.

در آزمایش‌های میدان جریان برای فریز کردن و تثبیت بستر برای پاشیدن دوغاب سیمان از کمپرسور هوا استفاده شد. لازم به گفتن است که ضخامت لایه دوغاب سیمان به منظور حفظ زبری بستر بسیار کم بوده است. سرعت سنج مورد استفاده Vectrino II از نوع حسگر رو به پایین ۱ کابلی از

### ۳- تحلیل نتایج

#### ۳-۱- الگوی جریان متوسط

بر اساس مقادیر متوسط گیری شده زمانی<sup>۱</sup> سری های سرعت اندازه گیری شده در هر نقطه از پروفیل سرعت، خطوط جریان در دو صفحه نزدیک بستر ( $Z=4\text{mm}$ ) و لایه های میانی میدان جریان ( $Z=74\text{mm}$ )، حاصل از دو مولفه افقی سرعت در کل محدوده اندازه گیری شده، تعیین شده و در شکل (۳) نشان داده شده است ( $Z$ : فاصله تراز اندازه گیری سرعت از بستر). در بالادست آبشکن در ترازهای مجاور بستر خطوط جریان به سمت قوس داخلی منحرف می شود. در حالیکه در ترازهای میانی، خطوط جریان در بالادست آبشکن تقریباً به موازات دیواره های کانال است و با نزدیک شدن به آبشکن، در نتیجه جدایی جریان، کمی منحرف می شود. در ناحیه نزدیک بستر، جدایی جریان در فاصله دورتری از بالادست آبشکن نسبت به لایه میانی رخ می دهد و میزان انحراف خطوط جریان در این ناحیه بیشتر از لایه میانی است. جریانی که وارد فضای بین دو آبشکن اول و دوم و آبشکن های دوم و سوم است، سبب تشکیل یک گردابه در پلان می شود. مختصات مرکز این گردابه نشان می دهد با نزدیک شدن به سطح آب، در فضای بین دو آبشکن، مرکز این ناحیه چرخشی به آبشکن پایین دستی نزدیکتر می شود. طول ناحیه چرخشی در پایین دست آبشکن سوم (فاصله محل برخورد خطوط جریان به دیواره قوس خارجی در پایین دست آبشکن سوم تا محور جان آبشکن سوم) در تراز میانی ۴ برابر طول موثر آبشکن و در تراز مجاور بستر ۲/۸۹ برابر طول موثر آبشکن است؛ در نتیجه با مقایسه فضای جدایی جریان در ترازهای مختلف، می توان گفت با نزدیک شدن به سطح آب، طول ناحیه جدایی جریان کاهش می یابد و مرکز این جریان چرخشی از آبشکن سوم دور می شود. در ترازهای میانی خطوط جریان متمایل به قوس خارجی بوده و بعد از ناحیه چرخشی پایین دست آبشکن سوم، به دیواره کانال برخورد می کنند. در تراز مجاور بستر، خطوط جریان در کلیه مقاطع به سمت قوس

شرکت NORTEK نروژ است. دستگاه Vectrino II در یک ستون آب ۳ سانتی متری، سرعت جریان را پروفیل می نماید و سه مولفه سرعت را با دقت ۱ میلی متر و نرخ نمونه گیری تا 100 Hz می دهد. در شکل (۲) محدوده اندازه گیری سرعت به وسیله سرعت سنج نشان داده شده است. سپس داده های برداشت شده در برنامه ای که در محیط MATLAB نوشته شده است، فیلتر می شوند.

شکل ۲ محدوده پروفیل سرعت در Vectrino II

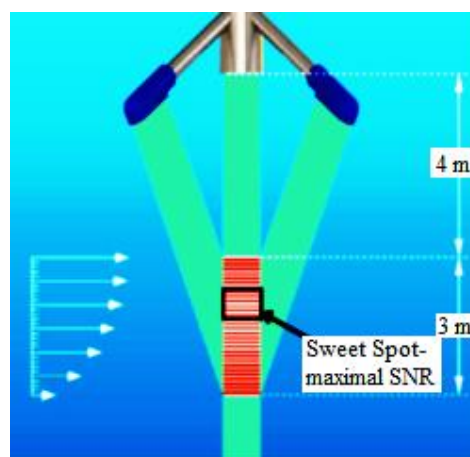


Figure 2. Range of velocity profile in Vectrino II

در آزمایش میدان جریان بستر کانال به صورت هموار است. محدوده برداشت قوس ۹۰ درجه شده شامل کل قوس است با در نظر گرفتن این مسئله که به علت محدودیت دستگاه سرعت سنج، عمق چهار سانتی متری از سطح آب برداشت نشده است بنابراین بالاترین تراز اندازه گیری شده معادل ۶۱٫۷٪ از عمق جریان ورودی در کانال مستقیم بالادست است. جمعا ۴۷ مقطع شعاعی و ۱۷ مقطع در عرض و در کل عمق جریان (به جز چهار سانتی متری از سطح آب) برداشت شد. علاوه بر برداشت میدان جریان، در آزمایش آبشستگی نیز الگوی کیفی جریان با تزریق پرمنگنات پتاسیم در آب و قرار دادن روبان های رنگی به دقت بررسی شد و با نصب دوربین در پیرامون کانال، پدیده های مختلف ضبط شدند که تصاویر جریان های مشاهده شده در قسمت تحلیل نتایج به تفصیل شرح داده شده اند.

در فضای بین آبشکن اول و دوم، در نواحی مجاور جان آبشکن اول جریان گردابی در عمق شکل می‌گیرد و با نزدیک شدن به آبشکن دوم، جریان عمدتاً بالارونده است. در فضای بین آبشکن دوم و سوم، مجاور جان آبشکن دوم نیز مشابه فضای بین آبشکن اولی و دومی، جریان گردابی ایجاد می‌شود؛ با این تفاوت که مرکز این گردابه بیشتر به کف نزدیک است. در پایین دست آبشکن سوم جریان چرخشی بازگشتی تشکیل می‌شود که ابعاد این ناحیه با نزدیک شدن به سطح آب، افزایش می‌یابد.

شکل ۴ خطوط جریان در یک مقطع طولی در فاصله  $75\%L$  از کناره خارجی

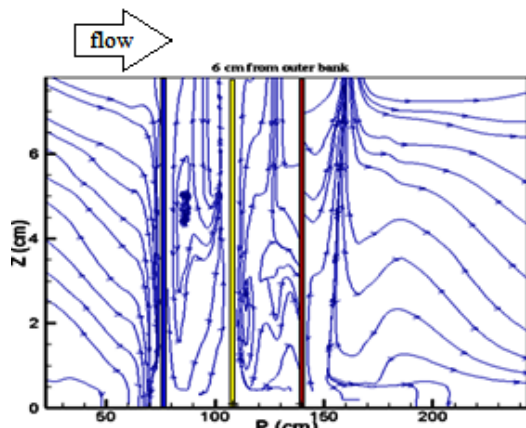


Figure 4. Longitudinal section of stream lines at  $75\%L$  from outer bank

شکل ۵ الگوی کیفی جریان بالادست آبشکن اول

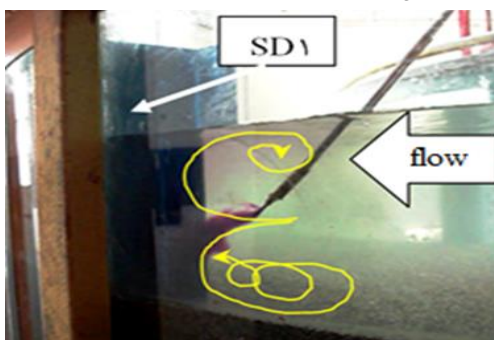


Figure 5. Flow pattern at upstream of the 1<sup>st</sup> spur dike

در شکل (۶) خطوط جریان در مقاطع عرضی مختلف نشان داده شده است. چگونگی اندازه‌گیری  $R'$  به این صورت است که مبدا  $R'$  روی دیواره خارجی قوس قرار دارد و راستای آن به سمت مرکز قوس است؛ به این معنی که  $R'=0$

داخلی متمایل می‌شوند و بعد از ناحیه چرخشی پایین دست آبشکن سوم، بتدریج و با نزدیک شدن به کانال مستقیم پایین دست، به موازات دیواره‌های کانال قرار می‌گیرند. براساس الگوی جریان فوق انتظار می‌رود بعد از شروع آبشستگی، رسوبات شسته شده از بالادست آبشکن اول در مقاطع انتهایی از قوس داخلی تجمع یابند.

شکل ۳ خطوط جریان در پلان در ترازهای مختلف

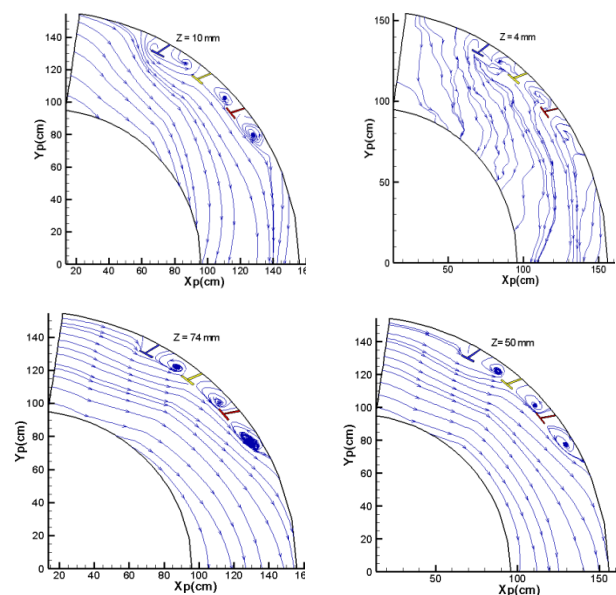


Figure 3. Stream line in plan at different levels

در شکل (۴) یک مقطع طولی در فاصله  $75\%L$  از کناره خارجی کانال نشان داده شده است.  $P$  معرف محیط کمانی از قوس خارجی است که آبشکن در آن واقع شده است و مبدا آن، محل اتصال قوس خارجی به کانال مستقیم بالادست است. از آنجایی که دستگاه سرعت سنج موجود، قادر به اندازه‌گیری  $4$  سانتی‌متری سطح آب نیست، پس در محدوده اندازه‌گیری شده در بالادست آبشکن اول تنها جریان پایین‌رونده در شکل نشان داده شده است؛ درحالی‌که تزریق ماده رنگی در بالادست آبشکن اول برای سطوح مجاور سطح آب نشان‌دهنده جریان گردابی بالارونده است که این جریان در شکل (۴) موجود نیست و در شکل (۵) بر اساس الگوی کیفی جریان نشان داده شده است.

نواحی مجاور بالادست بال آبشکن دوم ( $\theta = 36.5^\circ$ )، ناحیه یک به طور کلی از بین می رود و جریان در این ناحیه فقط شامل سلول چرخشی است که مجاور ساحل خارجی بالارونده است. این مسئله می تواند مبین آن باشد که بالادست آبشکن دوم، رسوب جمع می شود و آبستگي رخ نخواهد داد. در واقع با نزدیک شدن به آبشکن دوم به تدریج حضور جریانی که در مجاورت قوس خارجی و در امتداد بال آبشکن ها ایجاد می شد، کمرنگ می شود به صورتی که در بالادست آبشکن دومی ( $\theta = 36.5^\circ$ ) تنها یک ناحیه چرخشی دیده می شود و این مسئله نشان دهنده آن می تواند باشد که گرداب نعل اسبی تشکیل شده در بالادست آبشکن دومی، تا این ناحیه کشیده شده و در حال محو شدن است و انتظار می رود چاله آبستگي آبشکن اول تا این مرز گسترده شود. در فضای بین آبشکن دوم و سوم از امتداد بال آبشکن تا قوس داخلی یک سلول چرخشی تشکیل می شود. هسته این سلول چرخشی در فاصله 0/25B از کناره داخلی و 0/41Y از کف شکل می گیرد. در نواحی مجاور قوس خارجی، از میانه های عمق تا کف، جریان رو به پایین شکل می گیرد و از میانه های عمق به بالا، جریان بالارونده ایجاد می شود (B: عرض کانال). در لبه بالادستی بال آبشکن سوم ( $\theta = 49.1^\circ$ ) در فاصله دیواره کانال تا لبه آبشکن، جریانی رو به دیواره ایجاد می شود که بخش پایینی آن به صورت جریان بالارونده و بخش بالایی آن پایین رونده است. مرکز سلول چرخشی در این مقطع نسبت به مقطع قبل به قوس داخلی نزدیکتر می شود.

در پایین دست آبشکن سوم در مقطع عرضی شامل محدوده ناحیه جدایی جریان ( $\theta = 57.9^\circ$ )، سه نوع جریان متفاوت در مقطع شکل می گیرد. جریان (۱) همان سلول چرخشی مقطع قبل است که کوچکتر شده است و مرکز آن به قوس داخلی نزدیکتر شده است. جریان (۲)، جریانی است که در ناحیه جدایی جریان شکل می گیرد. جریان از سطوح بالاتر خود را به این ناحیه می رسانند و بنابراین ابعاد این ناحیه در ترازهای بالاتر، بزرگتر است. مجاور کف، خطوط جریان در این ناحیه جریان گردابی را نشان می دهند. جریان (۳)، جریانی است که در مرز جریان ناحیه اول و دوم شکل می گیرد. این سلول

نشان دهنده دیواره قوس خارجی و  $R^*=60$  نشان دهنده دیواره قوس داخلی و SD معرف آبشکن است. از آنجایی که سرعت سنج مورد نظر قادر به اندازه گیری ۴ سانتی متری سطح آب نیست، در مقاطع قبل از آبشکن اول ( $\theta = 22.1^\circ$ ) معرف مقطع قرارگیری آبشکن از قوس خارجی است. در این مقاله نتایج حاصل از تحلیل جریان متوسط گیری شده زمانی در محدوده اندازه گیری شده و ارتباط آن با آبستگي ارائه شده است.

به نظر می آید سلول چرخشی در ترازهای مجاور سطح آب در حال شکل گیری است و نشان از شکل گیری یک جریان عرضی چرخشی (جریان ثانویه) در مقطع دارد. که با جلو رفتن جریان در قوس، محور این سلول به ترازهای پایین تری منتقل می شود و جریان ثانویه در مقطع توسعه می یابد. در مقطع بالادست لبه بال آبشکن اول ( $\theta = 25.8^\circ$ )، با قرارگیری آبشکن در مسیر جریان در مجاور دیواره خارجی کانال، جریان پایین رونده ای ایجاد می شود که برخورد این جریان با کف، سبب ایجاد حفره آبستگي می شود. لازم به یادآوری است با ریختن ماده رنگی، الگوی کیفی جریان نشان از شکل گیری یک جریان بالارونده در بالادست آبشکن اول در ترازهای مجاور سطح آب دارد که به علت محدودیت سرعت سنج، در شکل نشان داده نشده است و در شکل (۵) آمده است. با گذشتن آبشکن اول، محور این سلول چرخشی همچنان به کف نزدیکتر می شود ( $\theta = 27.7^\circ$ ). تزریق ماده رنگی نشان می دهد در نتیجه وجود بال آبشکن، سرعت جریان در نواحی پشت بال بسیار کم است. در فضای بین آبشکن اول و دوم ( $\theta = 32.5^\circ$ ) دو نوع جریان متفاوت شکل می گیرد؛ بخش اول که از دیواره خارجی کانال تا امتداد لبه بال شکل می گیرد، به صورت جریان های گردابی پایین و بالارونده ای است که نشان دهنده ایجاد گرداب نعل اسبی است. بخش دوم همان سلول چرخشی مقاطع بالادست است که دوباره به بستر نزدیک شده است. سلول چرخشی که در ناحیه دو شکل گرفته بود از بین می رود و تمایل به خروج از مرکز ناحیه چرخشی و حرکت به سمت سطح آب و دیواره خارجی قوس دارد. در ناحیه یک نیز جریان در کف تا ترازهای میانی بالارونده و از سطح تا تراز میانی پایین رونده است. در

بستر، ابعاد این ناحیه کاهش می‌یابد و شامل یک سلول چرخشی است که به کف نزدیک است (جریان (۳)) و بخشی که مجاور قوس داخلی است، شامل دو سلول چرخشی است؛ سلول چرخشی اول (جریان (۱)) که تقریباً از ترازهای مجاور سطح آب شکل می‌گیرد و یک سلول چرخشی دیگر (جریان (۲)) نیز در داخل اولی ایجاد می‌شود.

### ۲-۳- آبستنگی

زمانی که آبشکن‌ها با فاصله  $3/5L$  قرار می‌گیرند؛ در لحظه برداشتن دریچه کشویی، در نتیجه‌ی جریان پایین‌رونده که در بالادست هر آبشکن ایجاد می‌شود و در شکل (۶) نیز در مقطع  $\Theta = 32.5^\circ$  مشهود است؛ در لبه بال هر سه آبشکن مقدار بسیار کمی شسته می‌شود اما تحت تاثیر گرداب نعل اسبی و توسعه حفره آبستنگی بالادست آبشکن اول، برخی از این رسوبات خود را به بالادست آبشکن دوم می‌رسانند؛ پس بالادست آبشکن دوم رسوب تجمع می‌یابد که بر اساس شکل (۳) و مشاهده مسیر انحراف خطوط جریان در ترازهای مجاور بستر، این مسئله قابل انتظار است. حرکت رسوبات به این صورت است که رسوباتی که از بالادست آبشکن اولی می‌آیند، برخی به سمت قوس داخلی و برخی وارد ناحیه بین آبشکن اولی و دومی می‌شوند. رسوبات تجمع یافته مقابل بال آبشکن دومی نیز برخی وارد فضای بین آبشکن دومی و سومی می‌شوند. رسوبات شسته شده در بالادست آبشکن سوم نیز برخی در فضای پایین‌دستی بال و جان آبشکن تجمع می‌یابند و برخی نیز امتداد بال آبشکن را طی کرده و به پایین‌دست می‌روند.

در بالادست آبشکن اول در ابتدای آزمایش آبستنگی مطابق شکل (۵) تزیق رنگ در لایه‌های میانی نشان می‌دهد جریان پس از برخورد به آبشکن، دو قسمت می‌شود؛ بخشی یک جریان پایین‌رونده را تشکیل می‌دهد که پس از برخورد با کف و ایجاد و توسعه حفره، به صورت گرداب نعل اسبی در قالب جریان گردابی امتداد بال را طی می‌نماید. بخش دیگر به صورت جریان بالارونده عمل می‌کند و با رسیدن به

چرخشی دارای ابعادی کوچک می‌باشد و نزدیک بستر ایجاد می‌شود.

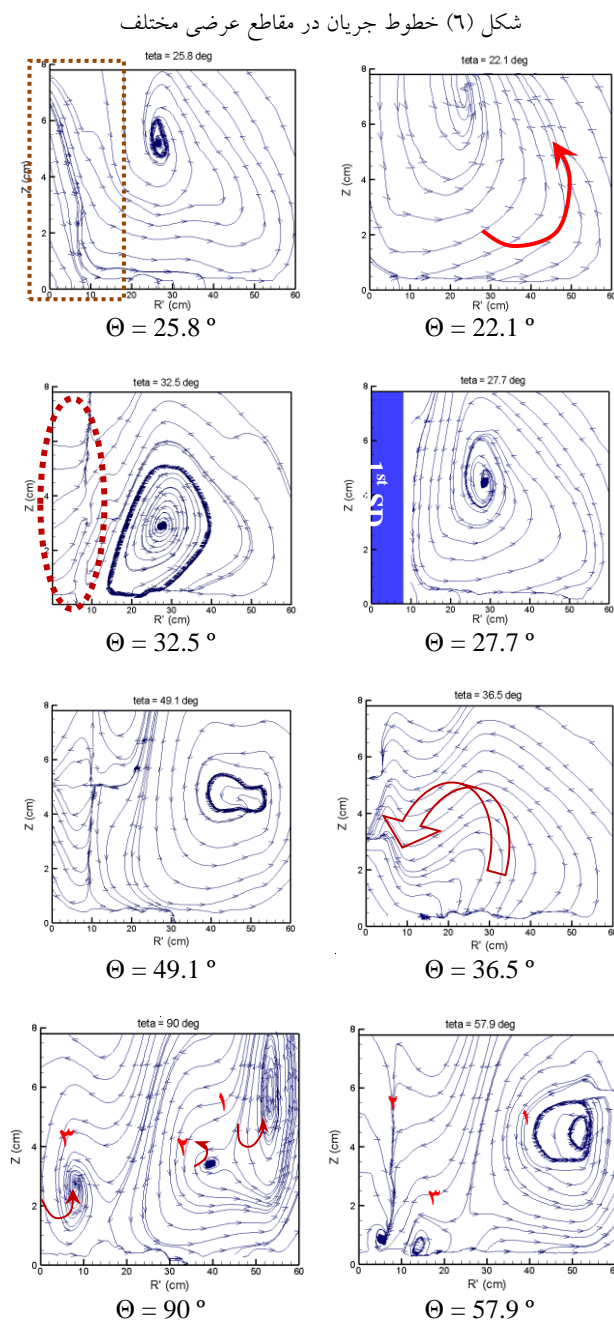


Figure 6. Stream lines at different cross sections

در مقطع انتهایی قوس ( $\theta = 90^\circ$ ) در بالاترین سطوح اندازه‌گیری شده، جریان در عرض به دو قسمت تقریباً مساوی تقسیم می‌شود. بخشی که در سمت قوس خارجی است؛ با نزدیک شدن به

گردد. جریان‌هایی که در این ناحیه دیده می‌شوند در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. در این شکل SD به مفهوم آبشکن است.

بعد از حدود ۹٪ زمان تعادل نسبی از شروع آبستگي، کل ناحیه بین آبشکن اولی و دومی را رسوب می‌پوشاند. در این زمان بالادست آبشکن سوم نیز بتدریج در حال شسته شدن است.

در ابتدای آزمایش در فضای بین آبشکن اول و دوم، جریان بازگشتی است. در این زمان هنوز رسوبات شسته شده از بالادست آبشکن اولی، به آبشکن دومی نرسیده‌اند و الگوی جریان مشابهی بین آبشکن اولی و آبشکن دومی با آبشکن دومی و آبشکن سومی دیده می‌شود. لازم به گفتن است جریانی که به صورت نعل اسبی از امتداد آبشکن اولی می‌آیند، بسیار سریع حرکت می‌کند و جریانی که در پشت بال آبشکن اولی شکل می‌گیرد جریانی با سرعت بسیار کم در این محدوده است. روند توسعه آبستگي به این صورت است که با توجه به حرکت رسوبات در فضای بین آبشکن اول و دوم، جریان گردابی کوچکی وجود دارد که سبب می‌شود رسوباتی که بالادست جان آبشکن دوم تجمع یافته‌اند، به سمت آبشکن اول بغلتند و تحت تاثیر گرداب نعل اسبی پیرامون آبشکن اول، وارد مسیر جریان اصلی شود که در شکل (۷) نشان داده شده است. پس ارتفاع پشته در فضای بین آبشکن اول و دوم در ابتدای آزمایش افزایش و بعد از مدتی نرخ کاهشی خواهد داشت. رسوباتی که بالادست بال آبشکن دومی تجمع می‌یابند، با گسترش حفره پیرامون آبشکن اولی، در حفره می‌افتند و در نتیجه ابعاد پشته کمتر می‌شود و مقایسه شکل‌های (۷ و ۸) گویای این مسئله است.

همان‌گونه که از شکل (۸) آشکار است؛ بعد از توسعه آبستگي در فضای بین آبشکن اول و دوم، دو نوع جریان وجود دارد: در بالادست جان آبشکن دوم در ترازهای میانی جریان به صورت گردابی بازگشتی است. پایین‌دست جان آبشکن اول نیز جریان به بستر برخورد نموده و در قالب یک جریان گردابی، در فضای بین آبشکن‌ها، از بین می‌رود.

سطح آب، رفته‌رفته مستهلک می‌شود. جریانی که در بالادست آبشکن اول به صورت جریان پایین‌رونده است، در برخورد با کف دو بخش می‌شود: بخشی به صورت گرداب نعل اسبی امتداد بال را طی می‌کند و بخش دیگر به صورت جریان بازگشتی روی دیواره حفره حرکت می‌کند و رسوبات را روی دیواره حفره به بالا برده و در قالب گرداب نعل اسبی دیگری به سمت قوس داخلی و پایین دست می‌رود. در نتیجه‌ی ایجاد حفره آبستگي بالادست آبشکن اول، شیب حفره از زاویه اصطکاک ایستایی رسوبات بیشتر می‌شود. در نتیجه مصالح از دیواره حفره به داخل آن حرکت می‌کنند. از طرفی درگیر گرداب پیرامون آبشکن اول می‌گردند و برآیند این سازوکار سبب جابه‌جا نمودن رسوبات از دیواره حفره به پایین دست می‌شود. و این عمل پیوسته ادامه می‌یابد. بخشی از این رسوبات در فضای بین آبشکن اول و دوم تجمع می‌یابند.

شکل ۷ الگوی کیفی جریان بین آبشکن‌ها در شروع آزمایش بین آبشکن

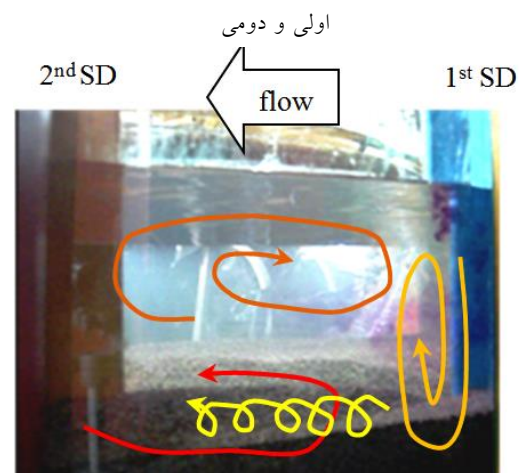


Figure 7. Flow pattern between the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> spur dike at the beginning of the experiment

براساس شکل (۷) که الگوی جریان بین آبشکن اول و دوم را نشان می‌دهد می‌توان گفت بعد از شروع آبستگي، رسوبات آبشکن اولی به آبشکن دومی می‌رسند. در این زمان وجود پشته رسوبی در مقابل پایین‌دست بال آبشکن اولی سبب ایجاد ناحیه با سرعت بسیار کم می‌شود. در نتیجه ماده رنگی با سرعت بسیار کم در این ناحیه پخش و ناپدید می‌-



سبب آبشستگی بالادست آبشکن سوم می شود.

شکل (۸) الگوی کیفی جریان بین آبشکن اولی و دومی بعد از توسعه آبشستگی

شکل (۹) الگوی کیفی جریان بین آبشکن دوم و سوم بعد از توسعه آبشستگی



Figure 9. Flow pattern between 2<sup>nd</sup> and the 3<sup>rd</sup> spur dike after scouring development

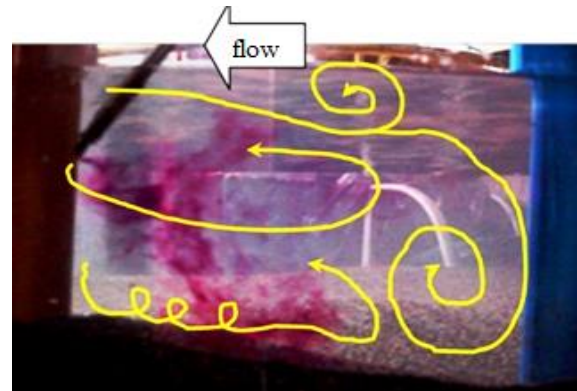


Figure 8. Flow pattern between 1<sup>st</sup> and the 2<sup>nd</sup> spur dike after scouring development

شکل (۱۰) توپوگرافی بدون آزمایش آبشستگی

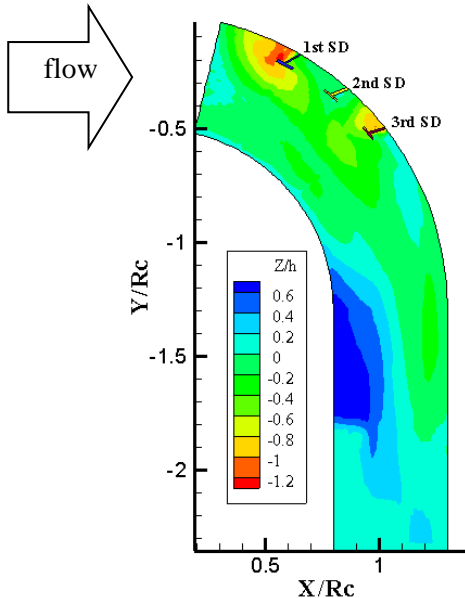


Figure (10) dimensionless topography of scouring experiment

شکل (۱۰) تغییرات توپوگرافی بستر حاصل از آزمایش آبشستگی را نشان می دهد. در فاصله  $3/5L$  آبشستگی بالادست آبشکن دوم  $33/5\%$  عمق آبشستگی بالادست آبشکن اول است در حالی که عمق بیشینه آبشستگی آبشکن سوم  $81/5\%$  آبشکن اولی است و این مسئله ناشی از آن است که رسوبات بالادست آبشکن اول، در فضای بین آبشکن اول و دوم تجمع می یابند و الگوی این ناحیه را تحت تاثیر قرار می دهند به شکلی که جریانی متفاوت بین آبشکن اول و دوم نسبت به بین آبشکن دومی و سومی شکل می گیرد که الگوی کیفی آن

همان گونه که در شکل (۸) نیز نشان داده شده است؛ ماده رنگی روی پشته بالادست آبشکن دوم در قالب جریان گردابی بازگشتی کوچک به مقابل بال آبشکن اول می رسد و در برخورد با گرداب نعل اسبی اولی، به سرعت محو می شود. پرتاب رسوبات در ناحیه بین آبشکن اول و دوم، از آبشکن دوم به اول به صورت جریان گردابی در عمق به بالا می رود که در شکل (۸) نیز نشان داده شده است. در شکل (۹) الگوی کیفی جریان بین آبشکن دوم و سوم نشان داده شده است. در شروع آزمایش بین آبشکن دوم و سوم یک جریان بازگشتی شکل می گیرد. در بالادست آبشکن سوم، جریان مشابه آبشکن اول است اما ضعیف تر. گرداب نعل اسبی در محدوده بین آبشکن سوم تا آبشکن دوم سبب می شود جریان گردابی بازگشتی از آبشکن سوم به سمت آبشکن دوم شکل بگیرد که با حرکت مماس بر کف و در نتیجه حمل رسوبات، سبب توسعه حفره در فضای بین آبشکن دوم و سوم می شود. بین آبشکن دوم و سوم، جریان در محدوده حفره مشابه جریان در بالادست آبشکن اول است که در شکل (۹) نیز نشان داده شده است. اما در ناحیه بین بال و جان آبشکن دوم جریانی بسیار آرام تر شکل می گیرد. در واقع می توان گفت در فاصله  $3/5L$  در نتیجه ایجاد جریان بازگشتی بین آبشکن دوم و سوم، کم کم فضای مانور گرداب نعل اسبی گسترش می یابد بنابراین به تدریج

آبشستگی دیگری مجاور دیواره شکل می‌گیرد که در نتیجه‌ی تجمع رسوبات در مقاطع انتهایی قوس و ایجاد تنگ‌شدگی در آن مقاطع، این چاله ایجاد می‌شود. به طور کلی براساس آنچه نتایج نشان داده اند می‌توان گفت میزان آبشستگی برای آبشکن‌ها با آرایش به کار رفته چنین می‌باشد: آبشستگی آبشکن اول < آبشستگی آبشکن دوم < آبشستگی آبشکن سوم. این مسئله نشان‌دهنده آن است که پیرامون آبشکن‌ها نیاز به حفاظت در برابر آبشستگی با همان روند گفته شده دارد. ضمن اینکه پس از آبشکن سوم در مقاطع انتهایی قوس مجاور ساحل خارجی، در نتیجه‌ی رسوبات شسته شده از آبشکن‌های بالادستی و تنگ‌شدگی در مسیر جریان، چاله آبشستگی دیگری نیز ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به تخریب ساحل شود؛ پس باید اقدامات لازم به منظور حفاظت از آن صورت گیرد.

## References

## ۵- مراجع

- [۱] Haltigin; W., T. ; Biron; M., P.; and Lapointe; F., M.; "Three-dimensional numerical simulation of flow around stream deflectors: The effect of obstruction angle and length"; *Journal of Hydraulic Research*; Vol. 45, No. 2, 2007, pp. 227-238
- [۲] Koken, M.; "Coherent structures around isolated spur dikes at various approach flow angles"; *Journal of Hydraulic Research*; Vol. 49, No. 6, 2011, pp. 736-743
- [۳] Ouillon; S.; Dartus; D.; "Three-Dimensional Computation of Flow around Groyne"; *Journal of Hydraulic Engineering*; Vol. 123, No. 11, 1997
- [۴] Kang; J.; Yeo; H.; "Experimental Study on the Flow Characteristics of -Type Groyne"; *Journal of Engineering*; Vol.3, 2011, pp. 1002-1011
- [۵] Sukhodolov; A.; Engelhardt; C.; Kruger; A.; and Bungartz; H.; "Case Study: Turbulent Flow and Sediment Distributions in a Groyne Field"; *Journal of Hydraulic Engineering*; Vol. 130, No. 1, 2004
- [۶] Weitbrecht; V.; Socolofsky; A., S.; Jirka; H.G.; Experiments on Mass Exchange between Groin Fields and Main Stream in Rivers; *Journal of Hydraulic Engineering*; Vol. 134, No. 2, 2008
- [۷] Yossef; M., F., M.; de Vriend; J.,H.; "Flow Details near River Groynes: Experimental Investigation"; *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 137, No. 5, 2011

شرح داده شد. در شکل (۱۱) پروفیل طولی بدون بعد توپوگرافی بستر در مقطع طولی به فاصله  $0/2B$  از قوس خارجی رسم شده است و در این مقطع طولی بیشینه عمق آبشستگی اتفاق می‌افتد.  $ds$  عمق آبشستگی و  $h$  عمق جریان در کانال مستقیم بالادست و  $SD$  معرف آبشکن است. مقایسه ابعاد چاله آبشستگی برای هر سه آبشکن در این شکل مشهود است. علاوه بر آن در مقطع مجاور ساحل خارجی بعد از آبشکن سوم، چاله آبشستگی دیگری مجاور دیواره شکل می‌گیرد که در نتیجه‌ی تجمع رسوبات در مقاطع انتهایی قوس و ایجاد تنگ‌شدگی در آن مقاطع، این چاله ایجاد می‌شود.

شکل (۱۱) پروفیل طولی بدون بعد در محل وقوع حداکثر آبشستگی

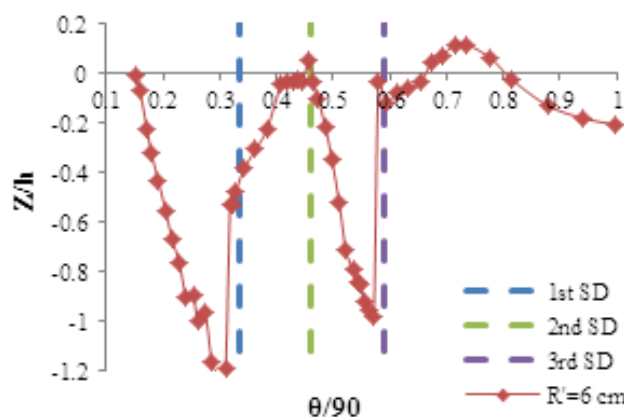


Figure 11. Dimensionless longitudinal bed profile at maximum scouring point ( $R/R_c=1.2$ )

## ۴- نتیجه‌گیری

زمانی که آبشکن‌ها با فاصله  $3.5L$  قرار می‌گیرند؛ در بالادست هر آبشکن، در نتیجه جریان پایین‌رونده حفره آبشستگی ایجاد می‌شود که تحت تاثیر گرداب نعل اسبی سبب توسعه آبشستگی پیرامون آبشکن می‌شود. در فاصله  $3/5L$ ، آبشستگی در بالادست آبشکن دوم  $33.5\%$  عمق آبشستگی بالادست آبشکن اول (بیشینه) است در حالی که عمق بیشینه آبشستگی آبشکن سوم  $11.5\%$  آبشکن اولی است. در مقطع مجاور ساحل خارجی بعد از آبشکن سوم، چاله

- [۱۰] Li, h., Barkdoll B. D., Kuhnle, R. and Alonso, C., Parallel Walls as an Abutment Scour Countermeasure. *Journal of Hydraulic Engineering*; Vol. 132, No. 5, 2006, pp. 510-520
- [۱۱] Godsian M.; Vaghefi M.; “Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend”; *International Journal of Sediment Research*, Vol. 24, No. 2, 2009, pp 145-158
- [۱۲] Vaghefi M.; Godsian M.; Salehi Neyshaboori S. A. A.; “Experimental Study on Scour around a T-Shaped Spur Dike in a Channel Bend”; *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No. 5, 2012
- [۸] Kuhnle, A., R.; Alonso V., C.; and Shields Jr D., F.; “Local Scour Associated with Angled Spur Dikes”; *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 12, 2002
- [۹] Karami, H., Ardeshir, A. , Behzadian, K., and Ghodsian, M., Protective Spur Dike for Scour Mitigation of Existing Spur Dikes, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 6, pp. 809–813, 2011

# Flow Field and Scouring around Series of Triplex Spur Dikes in Sharp Bend

M. Iranshahi<sup>1</sup>, M. Ghodsian<sup>2\*</sup>, M. Vaghefi<sup>3</sup>

1- M.Sc. of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Prof., Faculty of Civil and Environmental Eng., Water Eng. Research Institute, Tarbiat Modares University

3- Associate Prof. , Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr

ghods@modares.ac.ir

## Abstract:

Spur dike is one of the river training structures used for deviating the river flow from critical and erodible areas towards the central axis. As a result of flow, a zone with high turbulence around the spur dike is developed. The hydraulic process results development of the scour hole around the spur dike and settlement of sediment in the downstream and sides of the river. Several plan view shapes, such as straight, T-shape, and L-shape of spur dike have been constructed worldwide in accordance with different river environments. While scouring in spur dike structures results a serious threat to the river so it is needed to be investigated in this field. This paper describes flow field and scouring around series of Triplex rippling spur dikes (directed to the upstream) with a distance of 3.5 times of the effective length of the spur dike in the outer bank of a sharp bend channel. The first spur dike is located at section 30 degree from the start of bend. The experimental channel is a 90 degree channel with rectangular section. The radius of curvature to the channel width is 2, which is classified as a sharp bend. The bed materials used are uniform sand with mean diameter of 1.28 mm, its standard deviation coefficient of 1.3 and the relative density of sediment 2.35. Constant discharge of 25 l/s was used in the experiments. The results of flow field on flat bed and a scouring experiment are presented. The scouring test was done in 24 hours and in the moving threshold ( $U/U_c = 0.98$ ) under clear water condition. Flow field was recorded using the Vectrino II profiling velocimeter (NORTEK) as it can profile water in a 3 cm column. Dye injection technique is also used for flow observation. It was found that in the levels upstream of the first spur dike and adjacent to the bed, stream lines are deviated towards the inner bank. While in the middle levels, flow lines upstream of the spur dike is almost parallel to the channel walls and approached the spur dike, resulting deviation in the separation zone. In the scouring experiment it was obvious that at the beginning of the experiment, thus creating the down flow upstream of the spur dikes, scouring initiates near the wing of each spur dike and further develops by the horseshoe vortex. Then after scour hole upstream of the second and third spur dike starts. Details of sediment movements at the beginning of the experiment and after development of the scour hole are addressed. The circulation flows and secondary flows which formed in bend and the position of separation zone at different layers are also discussed. Scouring experiment illustrate that the amount of scour at the upstream of the second spur dike is about 33 % and at the upstream of the third spur dike is about 81 % of the maximum amount of scour that occurs upstream of the first spur dike. The mechanism of scour and flow field are also studied in this paper.

**Keywords:** flow field, scour, series of spur dikes, repellent, sharp bend.