

تأثیر سیستم تزریق هوا در کاهش آبستگي قوس ملایم ۹۰ درجه

پری ملکی^۱، جواد احدیان^{۲*}، سید محمود کاشفی پور^۳، منوچهر فتحی مقدم^۳ و آنتون اشلاز^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه لوزان سوئیس

*j.ahadiyan@scu.ac.

(دریافت مقاله: ۹۷/۷/۲۸؛ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۱/۱۵)

چکیده- یکی از روش‌های نوین حفاظت از سواحل رودخانه‌های آبرفتی در محل قوس‌ها و بهبود شرایط کشتیرانی، استفاده از سازه سیستم تزریق هوا است. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر این سازه بر توپوگرافی بستر و الگوی جریان در کانال قوسی ۹۰ درجه ملایم پرداخته شده است. بدین منظور آزمایش‌هایی تحت شرایط هیدرولیکی مختلف در اعداد فرود ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ و با ۳ زاویه ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه و با ۳ دبی تزریق هوا انجام شدند. نتایج نشان دادند وجود سازه در قوس موجب اصلاح الگوی مورفولوژی و توزیع سرعت شد به طوری که بیشینه عمق آبستگي را ۴۷٪ کاهش و آن را از قوس بیرونی دور نمود و بیشینه سرعت را از قوس بیرونی دور کرده و به میانه فلوام منتقل نمود، علاوه بر آن زاویه ۹۰ درجه دارای کمترین و زاویه صفر درجه بیشترین آبستگي را در قوس خارجی دارند. همچنین با افزایش دبی تزریق هوا عمق آبستگي کاهش یافت.

کلیدواژگان: قوس رودخانه‌ها، آبستگي، سیستم تزریق هوا، جریان ثانویه، الگوی جریان.

۱- مقدمه

الگوی غالب مورفولوژی رودخانه‌ها به صورت مارپیچی است. دلیل اصلی این ناپایداری‌ها توزیع نامتقارن سرعت در عرض و طول رودخانه است. همچنین با ورود جریان به قوس، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز سطح آب در قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار می‌گیرد که این امر موجب تشدید غرقابی شدن سیلاب دشته‌ها که منبع تجارت و صنعت هستند می‌شود. افت اصطکاکی اضافی در قوس رودخانه‌ها ناشی از جریان ثانویه است که در اثر اندرکنش جریان ثانویه و مؤلفه طولی سرعت موجب تشکیل جریان حلزونی در طول قوس می‌گردد. فرسایش در پاشنه ساحل خارجی توسط جریان‌های ثانویه حلزونی

شکل گرفته و موجب فرسایش و گودی بستر و از بین رفتن سواحل خارجی و اراضی آنها می‌شوند و رسوبات حاصل از آن به سمت ساحل داخلی باز می‌گردند، لذا همواره در قوس بیرونی فرسایش و در قوس داخلی رسوبگذاری وجود خواهد داشت. بر اثر پدیده فوق، اراضی و پوشش گیاهی همجوار قوس بیرونی رودخانه و همچنین تأسیسات ساحلی موجود در معرض تخریب قرار می‌گیرد. هر ساله محققان تحقیقات گسترده‌ای جهت حفاظت از قوس بیرونی رودخانه‌ها و فهم مکانیسم آبستگي انجام می‌دهند. یکی از اولین مطالعات انجام شده بر روی قوس خارجی رودخانه‌ها توسط Shukry (1950) که بر روی کانال ۱۸۰ درجه با نسبت‌های مختلفی از شعاع رودخانه

می‌شود. با بالا آمدن حبابهای هوا از سرتاسر لوله کارگذاری شده، تقریباً یک صفحه از حباب هوا در امتداد قوس خارجی رودخانه تشکیل و جریان ثانویه‌ای ایجاد می‌کند که در خلاف جهت جریان ثانویه جریان اصلی است در نتیجه به آن برخورد و آن را خنثی می‌کند، لذا جریان ثانویه اصلی از رسیدن به دیواره قوس خارجی و تخریب آن و همچنین فرسایش بستر در آن محدوده باز می‌ماند. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز به احداث سازه و پیشروی در عرض رودخانه اشاره نمود. همچنین صلب نبودن مانع ایجاد شده در مقابل جریان و سیال بودن آن موجب می‌شود خللی در بهره برداری از رودخانه از جمله انجام عملیات کشتیرانی ایجاد نشود.

مطالعات (Blanckaert et al. (2008 نشان داد در جریان مستقیم، حباب‌های ایجاد شده توسط دوران عرضی جریان، گستردگی حدود ۴ برابر عمق آب را پوشش می‌دهد و در جریان با انحنای شدید این گستردگی کمی ضعیف‌تر شده و حدود ۳ برابر عمق آب است.

(Dugue et al. (2011, 2012 در پژوهشی به بررسی قوس‌های مورفودینامیک با در نظر گرفتن میدان سرعت و توپوگرافی و استفاده از تکنیک سیستم تزریق هوا پرداختند. نتایج آنها نشان داد سلول جریان ناشی از حباب، عامل تغییر جهت هسته ماکزیمم سرعت‌های در جهت طولی و عمودی جریان، است. همچنین آنها الگوهای جریان ناشی از سیستم تزریق هوا در کانال قوسی ۱۹۳ درجه بر پایه اندازه‌گیری‌های ADV¹ اندازه‌گیری کردند. اصلاح قابل ملاحظه‌ای مورفولوژی بستر و کاهش چشمگیر میزان آبشستگی قوس بیرونی از نتایج مطالعه‌ی مذکور بوده است. همچنین ماکزیمم آبشستگی قوس بین زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه دورتر از قوس بیرونی و به سمت مرکز انتقال یافته است. (Dugue et al. (2013 با مطالعه بر روی کانال قوسی ۱۹۳ درجه گزارش کردند، الگوی جریان ناشی از حباب، جریان ثانویه ناشی از قوس را در امتداد رو به داخل تغییر و قدرت آن و همین‌طور به طور قابل توجهی شیب مورفولوژی را کاهش داد. همچنین عمق آبشستگی به میزان ۵۰٪ کاهش یافته و دورتر از دیواره بیرونی رخ داده است.

به عرض آن انجام شده است. شیب جانبی بستر در قوس توسط (Zimmermann and Kennedy, Ikeda (1975)، (1978)، (Odgaard, (1984 و (Blanckaert (2002 بررسی شد. (Giri and Shimizu (2004)، (Fazli et al. (2008)، (Sharma Mohapatra (2012)، (Mehraein et al. (2016 کوچک (۱۳۹۵) و غیره میزان آبشستگی در اطراف آبشکن در فلوام قوسی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد میزان آبشستگی وابسته به عدد فرود، طول آبشکن و موقعیت قرارگیری آبشکن است. بهرامی یاراحمدی (۱۳۹۲) به بررسی صفحات مثلی شکل در کانال قوسی ۹۰ درجه پرداختند. سوزپور و شفافی بجستان (۱۳۹۷) جابه‌جایی عرضی قوس رودخانه‌ها (مطالعه موردی قوس ۱۸۰ درجه رودخانه کارون) را با استفاده از صفحات مستغرق بررسی کردند. مدل‌سازی آزمایشگاهی کنترل آبشستگی در قوس‌های ۹۰ و ۱۸۰ درجه با استفاده از روش ریپ‌رپ و ترکیب ریپ‌رپ و صفحات مستغرق توسط (Biswas and Barbhuiya (2015, 2018 انجام شد. با وجود مؤثر بودن روش‌های ذکر شده بر روی کنترل و کاهش آبشستگی، اما تمامی آنها نیازمند احداث سازه‌ای در بستر رودخانه‌ها هستند از طرفی تشکیل گودالی در بستر و در اطراف سازه، عامل تخریب این سازه‌ها است. همچنین اجرای این سازه‌ها در رودخانه‌های دائمی و عمیق مستلزم صرف هزینه و وقت زیاد است، (سوزپور و شفافی بجستان، ۱۳۹۷). (Wijbenga et al. (2006 روش جدیدی به نام سیستم تزریق هوا^۱ جهت کاهش آبشستگی در قوس ۱۹۳ درجه گزارش کردند که اساس کار آن مقابله با جریان ثانویه ناشی از انحناء جهت جلوگیری از رسیدن این جریان به بستر و دیواره قوس خارجی و تخریب آن است. آنها در مقاله‌ای به بررسی توزیع سرعت و جریان ثانویه به وسیله سیستم تزریق هوا در قوس ۱۹۳ درجه پرداختند و این نتیجه بدست آمد که وجود این سیستم باعث ایجاد سلول گردشی شده که جریان ثانویه ناشی از انحناء را کاهش داد. در این روش یک لوله متخلخل در امتداد قوس و نزدیک به دیواره بیرونی روی بستر قرار گرفته و از این طریق هوای فشرده با فشار به درون جریان اصلی تزریق

¹ Air bubble screen

ها بر روی لوله، D فاصله لوله از دیواره خارجی قوس D_0 قطر لوله متخلخل، φ زاویه ایستایی ذرات، θ زاویه قوس، R شعاع قوس، S شیب کانال و α زاویه برخورد صفحه هوا با آب تعریف شده است. با استفاده از تئوری باکینگهام می‌توان رابطه (۱) را به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$\frac{Z}{h} = \left(\sigma g, \frac{D_0}{h}, \frac{B}{h}, \frac{D_{50}}{h}, \frac{d}{h}, \frac{d_0}{h}, \frac{D}{h}, \frac{L}{h}, \frac{R}{h}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{q}{Q}, \alpha, \theta, Fr, Re, S, \varphi \right) \quad (2)$$

که در آن $Fr = \frac{Vh}{\sqrt{gh}}$ عدد فرود و $Re = \frac{Vh}{\nu}$ عدد رینولدز جریان است. وقتی عدد رینولدز بزرگتر از ۱۰۰۰۰ باشد می‌توان از تأثیر لزجت صرف‌نظر کرد (Novak, 2004). در این تحقیق حداقل عدد رینولدز برابر ۴۲۸۵۷ است، لذا می‌توان عدد رینولدز را از پارامترهای بی بعد بدست آمده نادیده گرفت، از طرفی مقادیر S ، $\frac{\rho_s}{\rho}$ ، $\frac{D_{50}}{h}$ ، $\frac{D_0}{h}$ نادیده گرفته شده است، لذا پارامترهای نهایی به صورت رابطه (۳) خواهند بود:

$$\frac{Z}{h} = f\left(\frac{q}{Q}, \alpha, Fr\right) \quad (3)$$

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در کانال قوسی ۹۰ درجه با مقطع مستطیلی در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. در این کانال طول قسمت مستقیم بالادست ۵ متر و طول قسمت مستقیم پایین‌دست آن ۳ متر است که توسط قوس ۹۰ درجه به هم متصل شده است. شعاع بیرونی و درونی قوس به ترتیب ۳/۱۵ و ۲/۴۵ متر با عرض ۰/۷ متر، با نسبت شعاع متوسط به عرض برابر ۴ بود. برای کنترل سطح آب از دریچه تنظیمی در انتهای فلوم استفاده شد. کف فلوم از رسوباتی با قطر متوسط ۱/۵ میلی‌متر با انحراف معیار $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5} = 1.22$ در لایه‌ای به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر پوشیده شده بود. شکل ۱ نمای از این فلوم را نشان می‌دهد. برای تسطیح سطح رسوبات در طول فلوم، از ارابه‌ای مجهز به یک صفحه فلزی قائم، با قابلیت جابه‌جایی در عرض فلوم، استفاده شد.

براساس گزارش‌های Dugue et al. (2015) قدرت و اندازه جریان ناشی از حباب، مستقل از سرعت جریان پایه است و با عمق آب افزایش یافت. اندازه و قدرت سلول جریان ناشی از حباب در بستر متحرک بزرگتر از بستر غیر متحرک است. آنها معتقد هستند که این تحقیق، می‌تواند به عنوان یک تکنیک اصلاح مورفولوژی در رودخانه‌های کم عمق و کانال‌های باز مورد استفاده قرار گیرد.

Izadinia and Heidarpour (2015) تفاوت روش‌های کنترل آبشستگی اطراف پایه پل را مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که گردنبد کامل ایجاد حباب هوای ناشی از سیستم تزریق هوا مؤثرترین روش کنترل آبشستگی نسبت به سایر روش‌هایی همچون طوقه و کابل است. براساس گزارش‌های آنها کاربرد تکنیک تزریق حباب می‌تواند توجیه اقتصادی و عملی در وضعیت‌های واقعی (رودخانه‌های واقعی) برای مقابله با پدیده آبشستگی داشته باشد. با توجه به بررسی منابع عوامل زیادی می‌تواند بر این تکنیک تأثیرگذار باشند. مزایای این روش نسبت به سایر روش‌های حفاظت از قوس، محققان را به مطالعه بیشتر این تکنیک نوین سوق می‌دهد. لذا این مقاله به بررسی تغییرات توپوگرافی بستر، الگوی توزیع سرعت در کانال قوسی ۹۰ درجه و تأثیر میزان دبی تزریق هوا در سیستم سیستم تزریق هوا می‌پردازد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر در عملکرد سیستم جت هیدرولیکی غیر همافز جهت حفاظت قوس‌های رودخانه‌ای در رابطه (۱) آورده شده است:

$$Z = f(B, S, R, Q, h, \rho, g, \mu, D_{50}, \sigma_g, \rho_s, \varphi, \alpha, L, d_0, d, D, \theta, D_0, q) = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه، B عرض کف کانال، h عمق بالا دست جریان، q دبی تزریق هوا، Q دبی جریان ورودی، Z عمق آبشستگی، g شتاب ثقل، ρ چگالی سیال، ρ_s چگالی ذرات رسوب، μ لزجت دینامیکی سیال، D_{50} قطر متوسط ذرات بستر، σ_g انحراف معیار هندسی توزیع ذرات بستر، L طول لوله متخلخل، d_0 قطر روزنه‌ها بر روی لوله، d فاصله روزنه-

که جمعاً تعداد ۲۰ نقطه در هر مقطع عرضی و ۲۴ مقطع در طول کانال اندازه‌گیری شد. شرایط آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ محدوده پارامترهای آزمایشگاهی

دبی جریان (l/s)	$Q_1=30$	$Q_2=33$	$Q_3=36$	$Q_4=39$
دبی تزریق هوا (l/min)	$q_1=46$	$q_2=48$	$q_3=50$	-
عدد فرود	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۴۷
عمق جریان (cm)	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
دانه‌بندی رسوبات	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
D/h	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳
d/h	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵

برای بررسی الگوی توزیع سرعت در قوس ملایم بدون حضور و با حضور سیستم تزریق هوا از دستگاه سرعت سنج الکترومغناطیس JEFALC مدل ACM3-RS با دقت $\pm 2\%$ استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها با فرکانس ۲۰ هرتز و به مدت ۶۰ ثانیه در هر نقطه انجام شد. پس از اتمام هر آزمایش بستر تثبیت شده به گونه‌ای که در زمان اندازه‌گیری سرعت هیچ ذره‌ای جابه‌جا نشود. مؤلفه‌های ۳ بعدی سرعت طولی، عرضی و عمقی برای دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه و دبی تزریق ۵۰ لیتر بر دقیقه در اعماق ۳، ۸، ۱۱ و ۱۶ از بستر برداشت شد. شکل ۲ شماتیکی از مقاطع برداشت سرعت و شکل ۳ سرعت سنج ۳ بعدی و نمایی از عملکرد سازه را در حین آزمایش نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

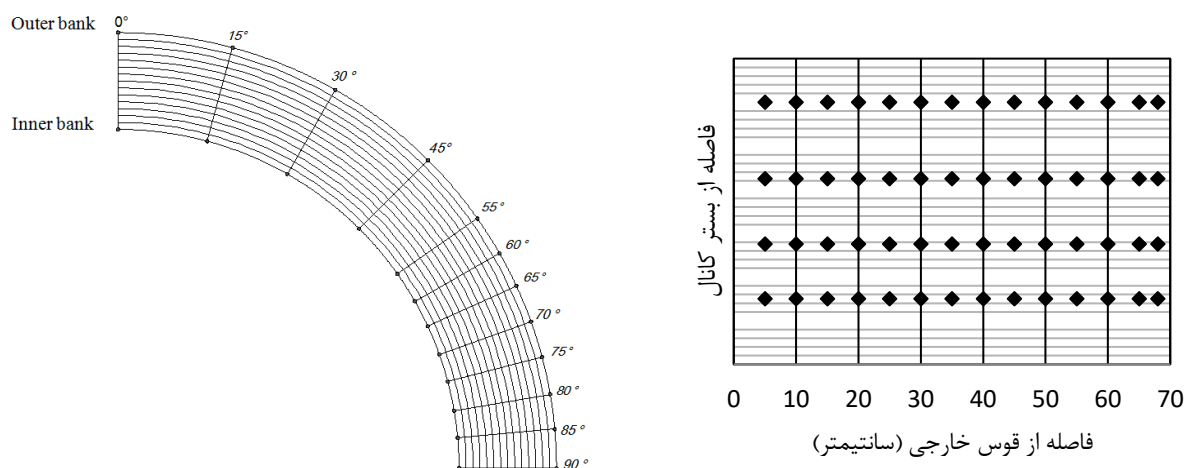
۳-۱- تأثیر سازه هوادهی بر روی مورفولوژی بستر

توپوگرافی بستر برداشت شده، با استفاده از نرم‌افزار Tecplot 8.0 ترسیم شد. شکل‌های ۵-ب و ۵-د تغییرات توپوگرافی بستر را در آزمایش‌های شاهد (بدون حضور سیستم هوادهی) به ازای عدد فرود ۰/۴۱ و ۰/۴۵ نشان می‌دهد. در آزمایش‌های بدون سازه، فرسایش در قسمت ابتدایی قوس (یک سوم ابتدایی) شروع و تا انتهای فلوم ادامه یافته است. حداکثر عمق آبشستگی برای عدد فرود ۰/۴۱ و ۰/۴۵ به ترتیب برابر ۴/۹ و ۷/۴ سانتی‌متر و در مقطع 65° تا 70° درجه شکل گرفته است.



شکل ۱ نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

تمامی آزمایش‌ها در ۴ دبی ۳۰، ۳۳، ۳۶ و ۳۹ لیتر بر ثانیه با عمق ۱۱ سانتی‌متر تحت شرایط آب زلال انجام گرفت. همچنین برای تعیین زمان تعادل، آزمایش طولانی مدت ۱۲ ساعته در دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه انجام شد سپس نمودار درصد ماکزیمم آبشستگی با زمان ترسیم شد. با توجه به آن مشاهده شد که ۹۰ درصد حداکثر آبشستگی در زمان ۳/۷ ساعت اتفاق افتاد لذا با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مدت زمان لازم جهت هر آزمایش ۴ ساعت انتخاب شد. دبی جریان به وسیله دبی سنج آلتراسونیک با دقت $\pm 1\%$ درصد اندازه‌گیری شد. سیستم تزریق هوا از لوله‌ای متخلخل به قطر بیرونی ۱/۵ سانتی‌متر نصب شده بر روی پایه‌های فلزی شکل گرفت و دبی تزریق هوا توسط روماتر اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در ۳ دبی تزریق هوا ۴۶، ۴۸ و ۵۰ لیتر بر دقیقه انجام شد. همچنین از دو دستگاه بلور ۸۰۰ وات جهت تأمین دبی هوا استفاده شد که از دو طرف به دو سر لوله وصل شد تا دبی هوا به شکل یکنواخت در تمام طول لوله تزریق شود. شایان ذکر است که لوله متخلخل از ابتدای کانال تا ۱ متری پایین‌دست آن نصب شد. جهت انجام آزمایش‌ها ابتدا دریچه کنترل پایین‌دست بسته شده و شیر ورودی کانال به آرامی باز شده به گونه‌ای که هیچ انتقال رسوبی به پایین‌دست صورت نگیرد. با افزایش تدریجی عمق آب در کانال به تدریج دریچه کشویی پایین‌دست باز شده و همزمان دبی ورودی به فلوم به آرامی افزایش و با ادامه این روند دبی و عمق مورد نظر تنظیم شد. پروفیل کف به کمک متر لیزری با دقت ($\pm 1.5\text{mm}$) برداشت شد. نحوه برداشت نقاط توپوگرافی به این صورت بود که فاصله نقاط عرضی ۳/۵ سانتی‌متر و فاصله مقاطع طولی ۵ درجه انتخاب شد



شکل ۲ شماتیکی از نقاط برداشت سرعت



(ب)



(الف)

شکل ۳ (الف) سازه هوادهی در فلوم در زمان انجام آزمایش ، (ب) سرعت سنج ۳ بعدی

شکل‌گیری جریان‌های ثانویه و حلزونی است. محققان زیادی از جمله شاکر و کاشفی‌پور (۱۳۹۳)، بهرامی یاراحمدی (۱۳۹۲)، کوچک و همکاران (۱۳۹۶) و آرمان و همکاران (۱۳۹۶) پیش از این نیز چنین الگویی را در قوس ۹۰ درجه گزارش کردند. در آزمایش‌های بدون هوادهی حداکثر رسوبگذاری در مجاورت دیواره قوس داخلی، به شکل پیوسته و با تلماسه‌هایی با بزرگی ۳ تا ۴ سانتی‌متر از زاویه ۲۵ درجه شروع و تا پایین‌دست قوس ادامه داشت ولی در آزمایش‌های با حضور سیستم هوادهی

زیرا پس از خروج جریان از انتهای قوس میزان عمق آب به دلیل وجود انحنای قوس افزایش یافته و جریان تمایل به بازگشت حالت مستقیم را دارد، در نتیجه میزان آن کاهش یافته و این کاهش عمق باعث گرادیان طولی منفی و به دنبال آن افزایش سرعت بیشتر می‌شود (فضلی و همکاران ۱۳۹۶). با توجه به شکل با وجود تغییرات جزئی در اعداد فرود جریان، تغییرات در کف فلوم کاملاً محسوس است. دلیل چنین الگویی شرایط خاص قوس و مکانیزم پیچیده جریان در قوس بوده که ناشی از

شکل ۵- الف و ۵- ج، بخشی از رسوبات در نیمه ابتدایی قوس داخلی و بخشی دیگر در انتهای قوس با ابعاد کوچکتر دیده شد. انتقال بار رسوبی در قوس خارجی نیز به شکل بسیار جزئی صورت گرفته و بستر به صورت هموار مشاهده شد. در تمامی آزمایش‌ها جریان آب پس از برخورد با حباب‌ها به سمت میانه فلوم منحرف شد و در نتیجه از رسیدن آن به ساحل خارجی و فرسایش آن جلوگیری نمود. علت این پدیده تولید جریان ثانویه متقابل توسط حباب‌هاست. سیستم هوادهی با ایجاد جریان ثانویه‌ای در خلاف جهت جریان ثانویه ناشی از قوس، الگوی سرعت را اصلاح و محل بیشینه‌ی آبشستگی یعنی محل ماکزیمم سرعت و تنش برشی را از قوس خارجی دور و به میانه فلوم جابه‌جا نموده است که این موضوع موجب ایجاد کانال فرسایشی در میانه فلوم شده و می‌توان ز آن جهت سهولت در خطوط کشتیرانی استفاده کرد (شکل‌های ۴ و ۵).

پروپیل عرضی آزمایش شاهد و آزمایش با سازه در عدد فرود ۰/۴۷ برای مقطع ۶۵ درجه در شکل ۶ نشان داده شده است. محور افقی نمایشگر فاصله نقاط برداشت شده از قوس بیرونی است که نسبت به عرض فلوم بی بعد شده و محور عمودی آن عمق ماکزیمم آبشستگی نسبی است. قوس بیرونی با عدد صفر و قوس داخلی با ۱ نشان داده

شده است. چاله فرسایشی در آزمایش شاهد از قوس بیرونی شروع و تا فاصله ۳۲ سانتی‌متری (X/B) برابر ۰/۴۵ از آن ادامه داشته و بیشینه آن ۸/۵ سانتی‌متر بود، ولی با حضور سازه هوادهی چاله فرسایشی به میانه‌های فلوم در فاصله ۳۵ تا ۶۶ سانتی‌متری (X/B) برابر ۰/۵ تا ۰/۹۴ از قوس خارجی منتقل شده و بیشینه مقدار آن به ۲/۶ سانتی‌متر (Z/h برابر ۰/۲۳) رسید لذا وجود سازه موجب کاهش ۶۹ درصدی در ماکزیمم آبشستگی شده و محل آن را تا ۹۰ درصد از مکان اولیه دور نموده است. در جدول ۲ میزان ماکزیمم آبشستگی و درصد کاهش آن برای مقطع 65° برای دبی تزریق (50 l/min) آورده شده است. در این جدول آزمایش‌های با حضور سازه (Run with bubble) با علامت RB نمایش داده شده و آزمایش‌های بدون سازه (Run) با R نشان داده شده است. میانگین کاهش عمق آبشستگی در تمامی آزمایش‌ها برای این مقطع در اعداد فرود ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ به ترتیب ۶۸/۱۸، ۷۰/۷۴، ۷۷/۵۳ و ۶۸ درصد است. پروپیل طولی آزمایش شاهد برای دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه و آزمایش با سازه در دبی ۳۶ لیتر در ثانیه و دبی تزریق ۵۰ لیتر بر دقیقه و زاویه ۹۰ درجه در شکل ۷ قابل مشاهده است.

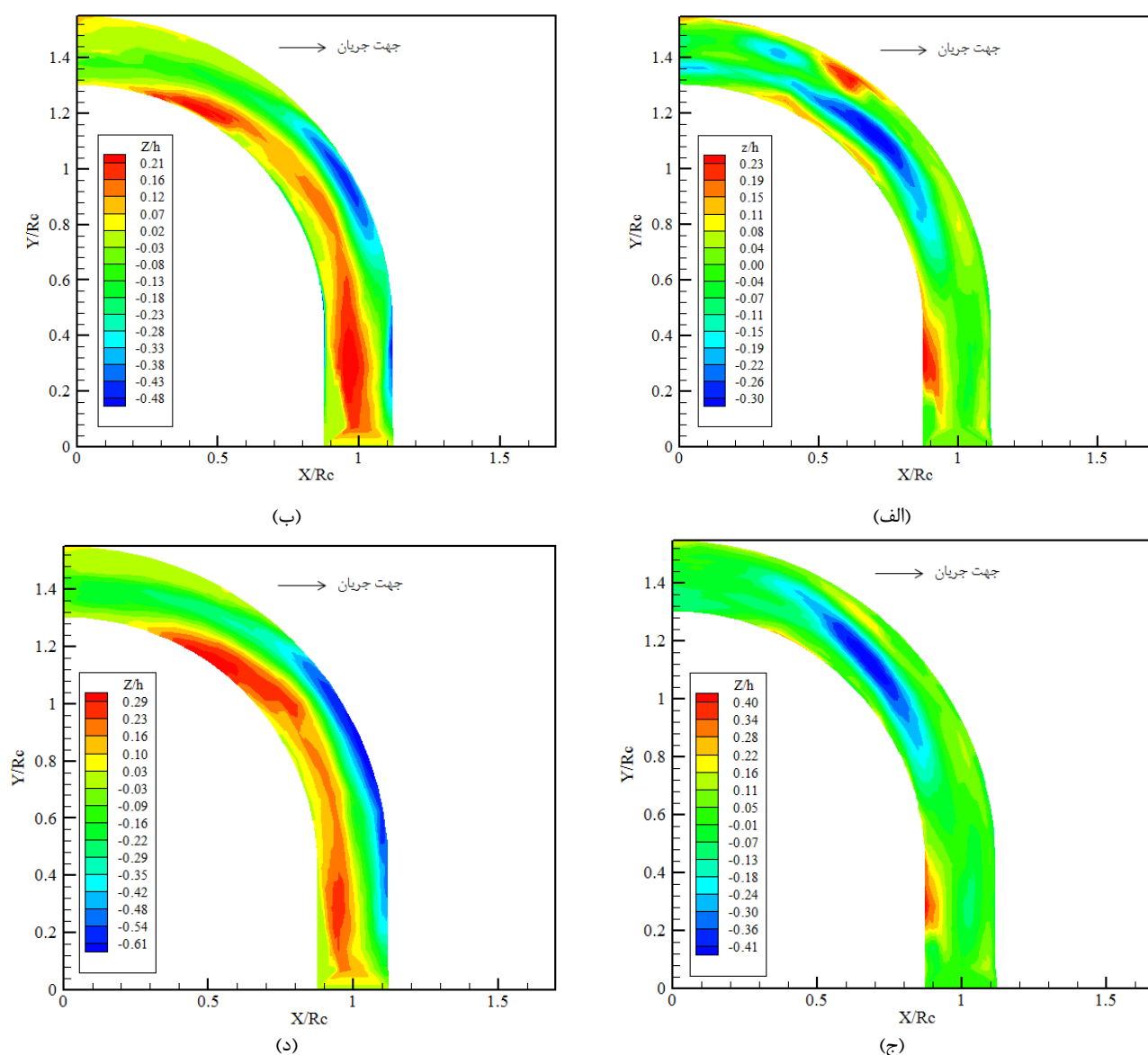


(ب)

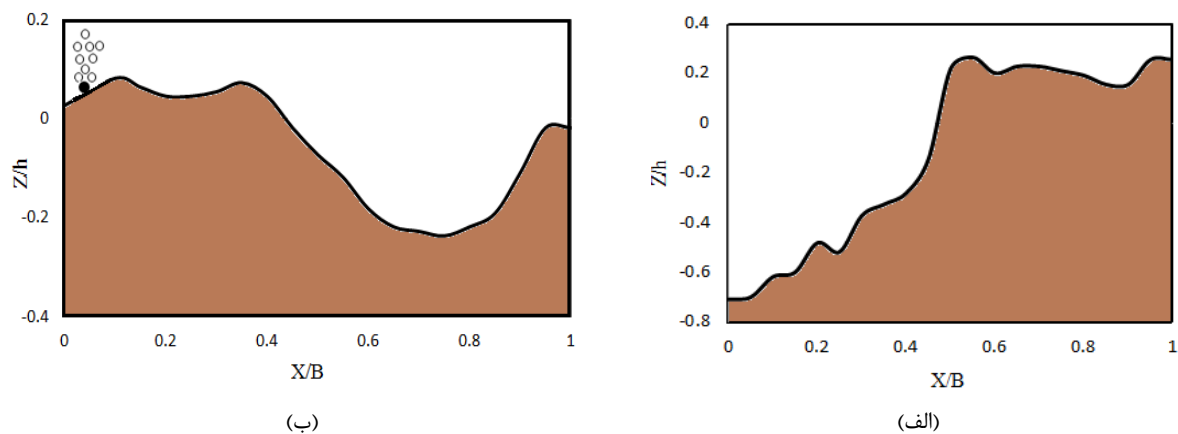


(الف)

شکل ۴ الگوی آبشستگی قوس در عدد فرود ۰/۴۵ (الف) بدون سازه - (ب) با وجود سازه



شکل ۵ توپوگرافی بستر: (الف) در حضور سیستم هوادهی، $Fr = 0.41$. (ب) بدون وجود سیستم هوادهی، $Fr = 0.41$. (ج) در حضور سیستم هوادهی، $Fr = 0.45$. (د) بدون وجود سیستم هوادهی، $Fr = 0.45$



شکل ۶ پروفیل عرضی مقطع 65° ، $Fr = 0.47$ ، $q = 48 \text{ l/min}$ (الف) بدون سیستم هوادهی (ب) با حضور سیستم هوادهی

در دبی ماکزیمم موجب کاهش ۴۷ درصدی در ماکزیمم آبشستگی در کل قوس شده است.

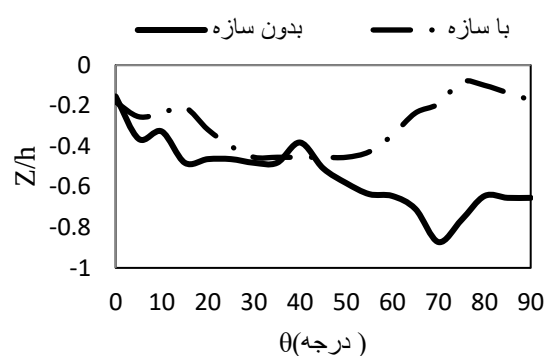
پیش از این (Wijbenga et al. 2008, Blanckaert et al. 2006) و (Dugue et al. 2011, 2012, 2013, 2015) بیشینه کاهش آبشستگی توسط این سازه را در قوس ۱۹۳ درجه، ۵۰ درصد گزارش کردند.

۲-۳- تأثیر دبی تزریق هوا بر مورفولوژی بستر

آزمایش‌های با حضور سازه هوادهی در ۳ دبی تزریق ۴۶، ۴۸ و ۵۰ لیتر بر دقیقه انجام شد. شکل ۸- الف نمودار بدون بعد پروفیل طولی را برای ۳ آزمایش در عدد فرود ۰/۴۷ نشان می‌دهد. هر سه پروفیل روند تقریباً مشابهی داشتند به گونه‌ای که چاله فرسایشی آنها در مکانی مشابه تشکیل شده و از زاویه ۱۰ تا ۷۰ درجه کشیده شده و از ۷۰ درجه تا انتهای فلولم یعنی در مکان ماکزیمم آبشستگی در آزمایش شاهد، میزان آن کاسته شده ولی به صفر نرسیده است. در تمامی آزمایش‌ها با افزایش دبی تزریق هوا در فاصله نزدیک قوس خارجی میزان فرسایش کاسته شده زیرا با افزایش دبی تزریق هوا قدرت جریان ثانویه ناشی از آنها افزایش یافته و با قدرت بیشتری جریان اصلی را از ساحل خارجی دور و به میانه فلولم انتقال داده است و در این قسمت با افزایش دبی تزریق هوا میزان فرسایش افزوده شده است که گودی میانه فلولم از اثرات مطلوب این سیستم بوده و افزایش گودی آن می‌تواند باعث سهولت در خطوط کشتیرانی شود. ماکزیمم عمق آبشستگی در دبی تزریق ۴۶، ۴۸ و ۵۰ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۲/۸۶، ۱/۱۶ و ۰/۹ سانتی‌متر بود در نتیجه مقدار آن به میزان ۶۶/۳، ۸۶/۳۵ و ۸۹/۴۱ درصد کاهش یافت. در شکل ۸- ب نمودار بدون بعد دبی تزریق هوا نسبت به دبی اصلی جریان در مقابل ماکزیمم عمق آبشستگی نسبی برای مقاطع ۶۵ و ۷۰ درجه را برای تمامی آزمایش‌ها نشان می‌دهد. هر دو مقطع روند یکسانی داشتند به گونه‌ای که با افزایش دبی تزریق هوا میزان عمق آبشستگی کاسته شده است و برای حداقل و حداکثر پارامتر محور افقی، ماکزیمم عمق آبشستگی در مقطع ۶۵° و ۷۰° به ترتیب ۸۳ و ۹۳ درصد کاهش یافت.

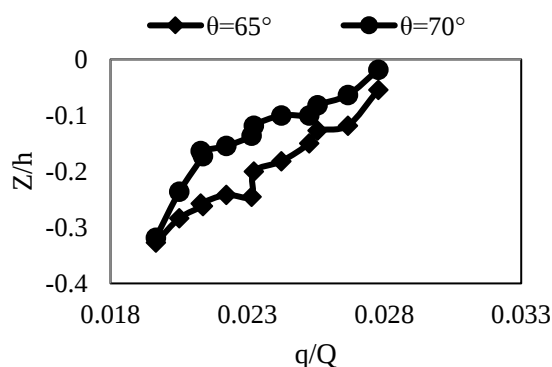
جدول ۲ مقایسه ماکزیمم عمق آبشستگی در مقطع ۶۵ درجه

درصد کاهش آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد	$Z_{max}(cm)$	F_r	آزمایش
-	۲/۲	۰/۳۷	R ₃₀₋₀₋₀
-	۴/۹	۰/۴۱	R ₃₃₋₀₋₀
-	۷/۴	۰/۴۵	R ₃₆₋₀₋₀
-	۸/۵	۰/۴۷	R ₃₉₋₀₋₀
۶۳/۶۳	۰/۸	۰/۳۷	RB ₃₀₋₄₆₋₉₀
۶۸/۱۸	۰/۷	۰/۳۷	RB ₃₀₋₄₈₋₉₀
۷۲/۷۲	۰/۶	۰/۳۷	RB ₃₀₋₅₀₋₉₀
۶۳/۲۶	۱/۸	۰/۴۱	RB ₃₃₋₄₆₋₉₀
۶۹/۳۸	۱/۵	۰/۴۱	RB ₃₃₋₄₈₋₉₀
۷۲/۶	۱	۰/۴۱	RB ₃₃₋₅₀₋₉₀
۶۷/۵۶	۲/۴	۰/۴۵	RB ₃₆₋₄₆₋₉₀
۷۹/۷۲	۱/۵	۰/۴۵	RB ₃₆₋₄₈₋₉₀
۸۲/۴۳	۱/۳	۰/۴۵	RB ₃₆₋₅₀₋₉₀
۶۳/۵۲	۳/۱	۰/۴۷	RB ₃₉₋₄₆₋₉₀
۶۹/۴	۲/۶	۰/۴۷	RB ₃₉₋₄₈₋₉₀
۷۸/۸۲	۱/۸	۰/۴۷	RB ₃₉₋₅₀₋₉₀

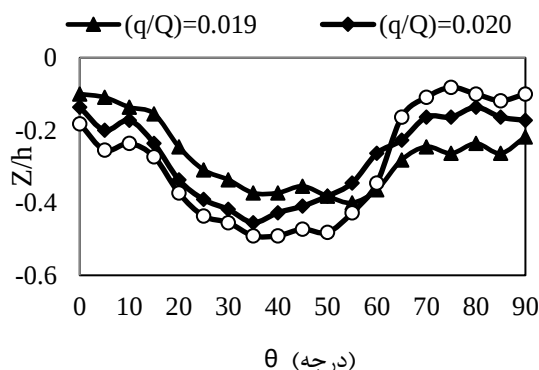


شکل ۷ پروفیل طولی برای آزمایش RB₃₉₋₅₀₋₉₀

با توجه به شکل ۷ در آزمایش بدون سازه دو گودال فرسایشی دیده می‌شود، گودال اول در ابتدای فلولم تا زاویه ۳۰ درجه بدلیل ورود جریان به قوس و ایجاد گردابه‌ها شکل گرفته و ابعاد آن نسبت به گودال دوم با ماکزیمم عمق ۹/۶ سانتی‌متری در انتهای فلولم و از زاویه ۴۵ درجه تا انتهای آن شکل گرفته کوچکتر است، لذا نشان می‌دهد نیمه دوم قوس نیاز به محافظت بیشتری دارد. با وجود سازه الگوی مورفولوژی کل قوس تغییر کرده به گونه‌ای که ماکزیمم چاله فرسایشی دوم به ۵ سانتی‌متر رسیده و از زاویه ۱۵ تا ۷۰ درجه کشیده شده است. لذا وجود سازه



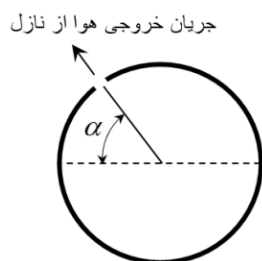
(ب)



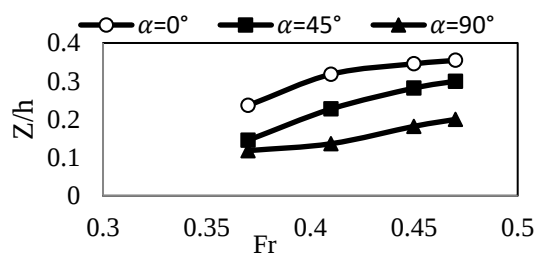
(الف)

شکل ۸ (الف) پروفیل طولی آزمایش‌های با عدد فرود $0.47/0$ در 3 دبی تزریق $46, 48$ و 50 لیتر بر دقیقه. (ب) نمودار بی بعد ماکزیمم عمق آبشستگی نسبی در مقابل دبی تزریق هوای نسبی

در کانال حرکت می‌کنند لذا قادر خواهد بود با آن مقابله کرده و آن را به میانه فلوام انتقال دهد. همچنین شکل نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود میزان آبشستگی در هر 3 زاویه افزایش یافته است. با افزایش عدد فرود سرعت برخورد خطوط جریان با صفحه حباب بیشتر شده که این امر موجب افزایش قدرت گردابه‌های نزدیک کف شده و عمق آبشستگی را افزایش می‌دهد.



شکل ۹ شکل شماتیکی از زاویه برخورد حباب هوا با جریان اصلی



شکل ۱۰ نمودار بی بعد عدد فرود در مقابل بیشینه عمق آبشستگی نسبی در زوایای مختلف (α)

۳-۳- تأثیر زاویه برخورد حباب هوا با جریان اصلی

(α) بر مورفولوژی بستر

با توجه به آنالیز ابعادی انتظار می‌رود زاویه برخورد حباب هوا با جریان اصلی (α) بر کارایی سازه تزریق هوا مؤثر باشد. زاویه در شکل ۹ نشان داده شده است.

برای بررسی زاویه بهینه برخورد حباب‌های هوا با جریان اصلی آزمایش‌هایی در 3 زاویه تزریق 0° ، 45° و 90° درجه بر روی لوله متخلخل ایجاد شد. نمودار عدد فرود در مقابل ماکزیمم آبشستگی نسبی برای هر 3 زاویه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند با کاهش زاویه از 90° به صفر درجه ماکزیمم عمق آبشستگی افزایش یافت، در عدد فرود $0.37/0$ بیشینه عمق آبشستگی نسبی مربوط به زاویه صفر درجه است که به ترتیب 39% و 52% بیشتر از زوایای 45° و 90° درجه است. همچنین در عدد فرود $0.47/0$ نیز بیشینه عمق آبشستگی در زاویه صفر درجه رخ داده که به ترتیب 14% و 42% بیشتر از زوایای 45° و 90° است. به طور کلی بیشترین میزان آبشستگی در زاویه صفر درجه رخ داد، علت افزایش آبشستگی در زاویه صفر درجه نسبت به سایر زوایا این است که در این حالت صفحه حبابی که تشکیل می‌شود به موازات و مماس با خطوط جریان اصلی بوده و تحمل و قدرت کافی جهت مقابله با خطوط جریان را ندارند در نتیجه جریان ثانویه‌ای که توسط آن ایجاد می‌شود ضعیفتر خواهد بود. به عکس زمانی که این زاویه به 90° درجه می‌رسد این صفحه عمود بر خطوط جریانی است که

$$Y = R \cos \theta \quad (7)$$

$$R = R_{out} - \Delta R \quad (8)$$

در این روابط، R فاصله نقطه اندازه‌گیری از مرکز قوس، θ زاویه نقطه اندازه‌گیری نسبت به محور y ، R_{out} شعاع خارجی قوس که برابر ۳/۱۵ متر و ΔR فاصله نقطه اندازه‌گیری از قوس بیرونی می‌باشد. در شکل ۱۱ موقعیت مختصات نقاط در سیستم قطبی و کارترین (X, Y) ارائه شده است. کانتورهای سرعت طولی در مقاطع عرضی 15° ، 65° و 90° درجه برای آزمایش شاهد و همچنین آزمایش با حضور سازه هوادهی در عدد فرود $0/45$ در شکل‌های ۱۱- الف، ب و ج ترسیم شده است، همچنین الگوی برداری برآیند سرعت‌های عرضی و عمقی آن‌ها در شکل‌های ۱۲- الف، ب و ج نشان داده شده است.

۴-۳- تأثیر سیستم هوادهی بر روی الگوی سرعت

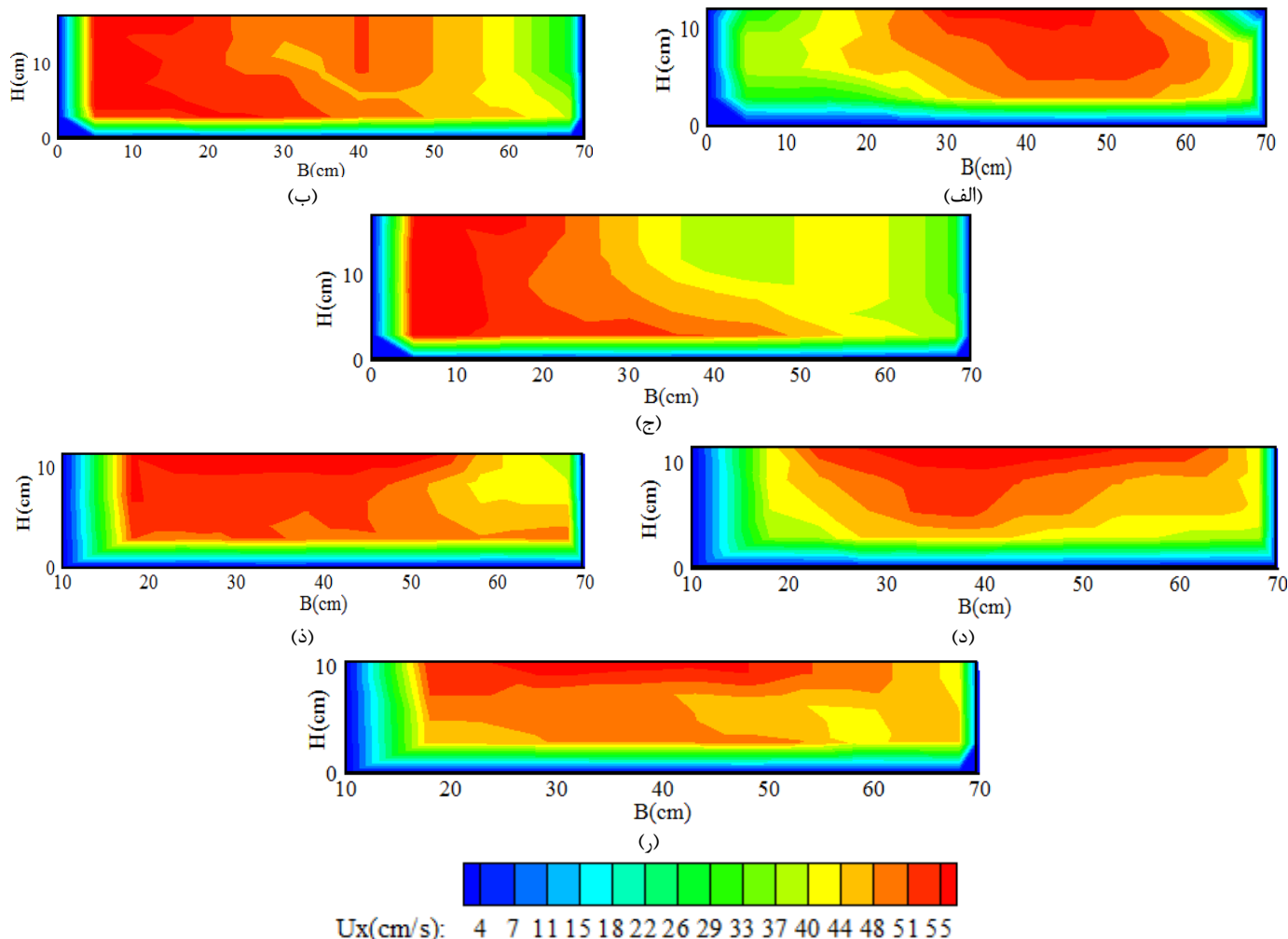
در بررسی الگوی سرعت با توجه به قوسی بودن فلو، مؤلفه‌های سه بعدی سرعت شامل U_r ، U_θ ، U_z بودند که جهت تجزیه و تحلیل نتایج مؤلفه‌های سرعت از مختصات قطبی (U_r, U_θ) به مختصات کارترین (u, v) تبدیل شدند. در روابط (۴) و (۵) نحوه تبدیل مؤلفه‌های سرعت از مختصات قطبی به کارترین نشان داده شده است.

$$u = U_r \sin \theta + U_\theta \cos \theta \quad (4)$$

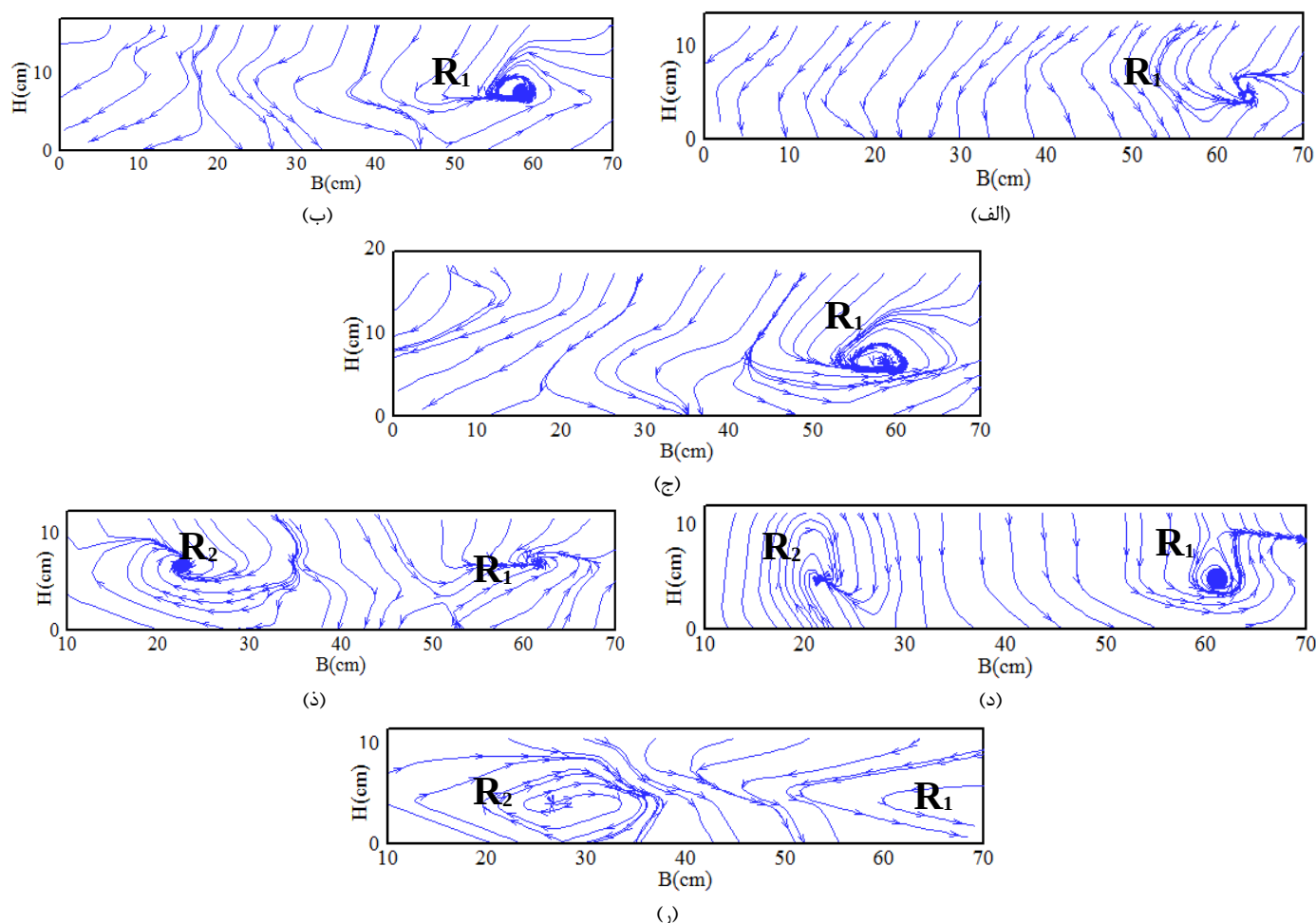
$$v = U_r \cos \theta - U_\theta \sin \theta \quad (5)$$

همچنین برای نمایش توزیع سرعت‌ها، مختصات نقاط نیز باید از سیستم قطبی به سیستم کارترین تبدیل می‌شد که نحوه تبدیل آن‌ها در روابط (۶) تا (۸) نحوه تبدیل نشان داده شده است.

$$X = R \sin \theta \quad (6)$$



شکل ۱۱ الگوی سرعت در آزمایش با عدد فرود $0/45$: بدون سازه برای مقاطع (الف) صفر درجه، (ب) 65° درجه، (ج) 90° درجه و با حضور سازه در مقاطع، (د) صفر درجه، (ذ) 65° درجه، (ر) 90° درجه



شکل ۱۲ الگوی جریان ثانویه در آزمایش با عدد فرود ۰/۴۵: بدون سازه برای مقاطع (الف) صفر درجه، (ب) ۶۵ درجه، (ج) ۹۰ درجه و با حضور سازه در مقاطع، (د) صفر درجه، (ه) ۶۵ درجه، (و) ۹۰ درجه

گرادیان فشار جانبی یک سلول جریان ثانویه پادساعتگرد از ابتدای قوس ایجاد می‌شود و تا 90° ادامه دارد که موجب انتقال خطوط جریان از سطح آب به بستر شده و با برخورد آنها به بستر موجب فرسایش در این ناحیه می‌شوند زیرا زاویه برخورد این خطوط در جدار بیرونی در جهت ناپایداری ذرات است در قوس داخلی این رویه برعکس است یعنی جهت خطوط از بستر به سمت سطح آب است و این خطوط موجب رسوبگذاری در این ناحیه می‌شوند (شکل‌های ۱۲ الف، ب و ج). محققانی همچون Shukry (1950)، Rozovskii (1957)، Blankart and (2001)، Ghodsian and Vaghefi (2009)، بهرامی یاراحمدی (۱۳۹۲) و کوچک (۱۳۹۵) چنین الگویی را مشاهده کردند. در حضور سازه هوادهی (شکل‌های ۱۲-د،

با توجه به شکل در مقطع 15° در ابتدای قوس ماکزیمم سرعت طولی در نزدیکی ساحل داخلی به فاصله ۵ سانتی‌متری از آن شکل گرفته است. گرچه این مقطع در ابتدای قوس است ولی یک جریان عرضی از دیواره بیرونی به سمت دیواره داخلی وجود دارد که نشان دهنده تأثیرگذاری جریان ثانویه موجود در قوس بیرونی (R_1) است. براساس پژوهش‌های Rozovskii (1957) تأثیر این جریان ثانویه در قسمت قبل از قوس نیز وجود دارد. در مقطع 65° تا مقطع 90° منطقه ماکزیمم سرعت در مجاورت دیواره بیرونی قرار گرفته که موجب فرسایش در این ناحیه می‌شود. جهت خطوط جریان در نزدیکی سطح آب به سمت قوس بیرونی و در نزدیکی بستر به سمت قوس داخلی است. به دلیل تقابل نیروی گریز از مرکز و

ذ و ر)، به دلیل تداخل بین حباب‌های هوا و سیگنال‌های دستگاه سرعت سنج، سرعت‌های نزدیک سیستم هوادهی قابل اندازه‌گیری نبود. به تدریج با فاصله گرفتن از شروع قوس در مقطع ۱۵ درجه، ۲ سلول جریان ثانویه ساعتگرد و پادساعتگرد دیده می‌شود که R_1 و R_2 نامگذاری شده‌اند. سلول R_1 در اثر نیروی گریز از مرکز و وجود گرادیان فشار در دیوار خارجی و داخلی ایجاد شده و R_2 ناشی از وجود حباب‌های هوا است. در تمامی مقاطع منطقه حداقل سرعت در نزدیکی ساحل خارجی قرار داشته و منطقه ماکزیمم سرعت از قوس بیرونی به میانه فلووم منتقل شده است (شکل‌های ۱۱ د، ذ و ر). ایجاد یک لایه برشی در بین ۲ سلول گردشی سبب حرکت خطوط جریان به سمت بستر می‌شود در نتیجه خط‌القعر از قوس بیرونی به سمت میانه فلووم انتقال یافته، همچنین ماکزیمم آبخستگی در محل برخورد ۲ سلول گردشی جایی که سرعت طولی ماکزیمم خود را دارد اتفاق افتاده است. (Wijbenga et al. (2006)، Blancaert et al. (2008) در تحقیقات خود نیز این موضوع را گزارش نمودند. در آزمایش شاهد به تدریج با فاصله گرفتن از شروع قوس در مقاطع ۱۵، ۶۵ و ۹۰ درجه بیشینه سرعت به ترتیب در فاصله ۴۰، ۱۵ و ۵ سانتی‌متر از دیواره خارجی و در آزمایش با حضور سیستم تزریق هوا این فواصل به ترتیب در ۴۳، ۴۸ و ۳۳ سانتی‌متری از قوس بیرونی قرار گرفته است در نتیجه وجود این سازه در قوس ماکزیمم سرعت را در مقاطع ۶۵° و ۹۰ درجه به ترتیب ۶۸ و ۸۴ درصد از دیواره خارجی دور نموده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی الگوی آبخستگی و رسوبگذاری و همچنین الگوی سرعت با وجود تأثیر سازه هوادهی و تحت شرایط آب زلال در یک کانال قوسی ۹۰ درجه پرداخته شد. آزمایش‌ها با ۴ عدد فرود ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ و در ۳ دبی تزریق هوا ۴۶، ۴۸ و ۵۰ لیتر بر دقیقه انجام شد. نتایج نشان دادند وجود سازه هوادهی در کانال قوسی موجب اصلاح الگوی مورفولوژی شده به

طوری که از میزان رسوبگذاری در قوس داخلی و میزان فرسایش در قوس بیرونی کاهش یافت. میانگین کاهش عمق آبخستگی در تمامی آزمایش‌ها برای مقطع ۶۵ درجه در اعداد فرود ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ به ترتیب ۶۸/۱۸، ۷۰/۷۴، ۷۷/۵۳ و ۶۸ درصد است. همچنین وجود سازه در دبی ماکزیمم جریان موجب کاهش ۴۷ درصدی در ماکزیمم آبخستگی در کل قوس شده است. با افزایش دبی تزریق هوا درصد کاهش آبخستگی افزایش یافت به گونه‌ای که از دبی تزریق ۴۶ به ۵۰ لیتر بر دقیقه درصد کاهش بیشینه آبخستگی از ۶۶٪ به ۸۹٪ رسید. آزمایش‌های بررسی زاویه بهینه جهت برخورد حباب‌های هوا به جریان اصلی نشان دادند کمترین میزان عمق چاله فرسایشی در زاویه برخورد ۹۰ درجه رخ داد به طوری که با اختلاف ۵۲ درصدی نسبت به زاویه صفر درجه به عنوان زاویه بهینه شناسایی شد. بررسی‌های میدانی سرعت نشان دادند با وجود سیستم هوادهی ۲ سلول گردشی در مقطع عرضی شکل گرفتند، گردابه اول ناشی از قوس و در جهت پادساعتگرد و گردابه دوم ناشی از حضور سیستم تزریق هوا و ساعتگرد بودند، در نتیجه این گردابه اثر سلول ناشی از قوس را خنثی و موجب اصلاح الگوی جریان و مورفولوژی شد.

۵- فهرست علائم

B	عرض فلووم
D	فاصله لوله از دیواره خارجی قوس
d	فاصله روزنه‌ها بر روی لوله
D_o	قطر لوله متخلخل
d_o	قطر روزنه‌ها بر روی لوله
F_r	عدد فرود
g	شتاب گرانش
h	عمق بالا دست جریان
Q	دبی
q	دبی تزریق هوا
R	شعاع قوس
Re	عدد رینولدز
Z	عمق آبخستگی
α	زاویه برخورد صفحه هوا با آب
θ	زاویه قوس

Coastal And Ocean Engineering Aquatic Procedia.

Biswas, P. and Barbhuiya, A. K. (2018). "Countermeasure of river bend scour using a combination of Submerged vanes and Riprap", International Journal of Sediment Research, <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.04.002i>.

Blanckaert, K. (2002). "Analysis of coherent flow structures in a bend based on instantaneous – velocity profiling", Third International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering EPFL.

Blanckaert, K. Buschman, F. A. Schleiss, A. and Wijnbenga, J. H. A. (2008). "Redistribution of velocity and bed-shear stress in straight and curved open channels by means of air bubble screen: Laboratory experiments". J. Hydraulic. Eng-ASCE. 134,(2), PP.184-195.

Blankart, K., and Graf, W. H. (2001). "Mean flow and turbulence in open channel bend", Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 127, No. 10., pp. 835-846.

Dugue, V. Blanckaert, K. and Schleiss, A. (2012). "Flow patterns induced by a bubble screen in a sharply curved flume based on Acoustic Doppler Velocity Profiler measurements". 8th Int Symp. on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Dresden, Germany, 19-21 September.

Dugue, V. Blanckaert, K. and Schleiss, A. (2011). "Influencing bend morphodynamics by means of an airbubble screen - Topography and velocity field". Proc. of the 7th IAHR Symp. on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Beijing, China.

Dugue, V. Blanckaert, K. and Schleiss, A. (2012). "An Air-Bubble Screen used as a countermeasure to Reduce Erosion in Open-Channel bends". ICSE6-204, 27-31 August, Paris.

Dugue, V. Blanckaert, K. Chen Q. and Schleiss A. (2015). "Influencing flow patterns and bed morphology in open channels and rivers by means of an air-bubble screen". J. of Hydraulic Eng-ASCE. 141(1), pp. 1-13.

Dugue, V. Blanckaert, K. Chen, Q. and Schleiss, A. (2013). "Reduction of bend scour with an airbubble screen: Morphology and flow pattern". Int J. of Sediment Res. 28(1), pp. 15-23.

Fazli, M. Ghodsian, M. and Salehi Neyshabouri, S.A.A. (2008). "Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend". International Journal of Sediment Research 23, pp. 56-68.

Ghodsian, M. and Vaghefi, M. (2009).

ρ	چگالی سیال
ρ_s	چگالی ذرات رسوب
σ_g	انحراف معیار هندسی توزیع ذرات بستر
ϕ	زاویه ایستایی ذرات

۶- منابع

آرمان، ع. ظهیری، ج. و فتاحی، پ. (۱۳۹۶). "شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب با حضور سری آبشکن‌ها در قوس ۹۰ درجه ملایم با استفاده از مدل CCHE2". نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ۲۴، شماره ۳، ص.ص. ۳۹-۲۱.

بهرامی یاراحمدی، م. (۱۳۹۲). "بررسی آزمایشگاهی ترکیب صفحات متصل به ساحل و تیغه افقی بر تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه"، (رساله دکتری)، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

سوزه‌پور، ع. و شفاعی بجستان، م. (۱۳۹۷). "کنترل جابجایی عرضی قوس‌های رودخانه‌ای با نصب صفحات شناور". نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۸، شماره ۱، ص.ص. ۱۴۳-۱۳۱.

شاکر، ا. و کاشفی‌پور، س.م. (۱۳۹۳). "بررسی آزمایشگاهی توزیع سرعت و تنش برشی جریان در قوس ۹۰ درجه همراه و بدون وجود سری آبشکن". نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۴، شماره ۳، ص.ص. ۵۵-۶۸.

کوچک، پ. کاشفی‌پور، س.م. قمشی، م. و فتحی، ا. (۱۳۹۶). "بررسی اثر استغراق و زاویه آبشکن باندا لایک نسبت به ساحل بر بیشینه عمق آبستگي اطراف آن بر قوس ملایم ۹۰ درجه". نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۷، شماره ۳، ص.ص. ۳۹-۲۷.

فضلی، م. قدسیان، م. و صالحی‌نیشابوری، س.ا. (۱۳۹۶). "تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه در شرایط مختلف جریان". مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۳۵، ص.ص. ۱۴۲-۱۲۳.

کوچک، پ. (۱۳۹۵). "بررسی اثر هندسه آبشکن باندا لایک بر روی الگوی فرسایش در قوس ۹۰ درجه در شرایط استغراق"، (رساله دکتری)، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

Biswas, P. and Barbhuiya, A. K. (2015). "Experimental study on scour at 90° horizontal forced bend and its protection using riprap", International Conference on Water Resources,

- Odgaard, A. J. (1984). "Flow processes in alluvial channel bend". *Journal of Water Resources research*, Vol. 24, No. 1, pp.5-46.
- Rozovskii, I. L. (1957). "Flow of water in bend of open channel". *Academy of sciences of the Ukrainin SSR, Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering*.
- Sharma, K. Mohapatra, P. (2012). "Separation Zone In Flow Past a Spur Dyke on Rigid Bed Meandering Channel". *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(10). pp. 897–901.
- Shukry, A. (1950). "Flow around bends in an open flume". *Trans. ASCE*, 115.
- Wijbenga, J.H.A. Schielen, R. Blanckaert, K. and Buschman, F. (2006). "Secondary flow and velocity redistribution by bubble screens in open channel bend". *Int Conf. on Fluvial Hydraulics, LISBON, PORTUGAL*, 6–8 September.
- Zimmermann, C. and Kennedy, J. F. (1978). "Transverse bed slopes in curved alluvial stream". *Journal of Hydraulic Division, ASCE*. Vol. 104, No. 1, pp. 33-48.
- "Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend". *Int .J .of Sediment Res* .24(2), pp. 145-158
- Giri, S. and Shimizu, Y. (2004). "Observation on bed variation in a meandering like flume with river training structures". *JSCE*, Vol. 48.
- Ikeda, S. (1975). "On secondary flow and bed profile in alluvial curved open channel. *Proc.16th Congr. Of IAHR*. Vol. 2, pp. 105–112.
- Izadinia, E. and Heidarpour, M. (2015). "Comparison of Different Configurations of Air-bubble Screens around the Pier to Control Scour". *International Congress on Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran*.
- Mehraein, M . Ghodsian, M. Khosravi, M. and Vaghefi, M.(2016). "Experimental Study on Flow Pattern And Scour Hole Dimensions Around a T-Shaped Spur Dike in a channel bend under Emerged and Submerged Conditions". *Int J Civ Eng*. DOI 10.1007/s40999-017-0175-x.
- Novak, P. Moffat, A.I.B. Nalluri, C. Narayanan, R. (2004). *Hydraulic structures*. Taylor & Francis, London.

The effect of air bubble screen on scouring reduction in a mild 90 degrees bend

Prai Maleki¹, Javad Ahadiyan^{2*}, Seyed Mahmood Kashefipour³, Manochehr Fathi moghadam³ and Aanton Schleiss⁴

1- Ph.D. Student of Water Engineering, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

4- Professor of Hydraulic Structures Engineering of Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland

*j.ahadiyan@scu.ac.

Abstract

An air-bubble screen is an innovative technique for riverbank protection along the bends which improve the navigation conditions in the alluvial rivers. In this research, the effects of this structure on a 90° mild and long bend on the bed morphology and flow pattern have been investigated. To this end, the experiments were carried out with three angles 0, 45, 90 degree and four Froude numbers of 0.37, 0.41, 0.45, 0.47 combined with three air discharge. Experiments performed in a mild bend using clear-water showed that the bubble screen was able to redistribute the velocity patterns and bed morphology in the bend. In addition, the results showed that maximum bend scouring is reduced about 47% and occurs further away from the outer bank and high velocity zone shifted toward the center of the channel. The results showed that the maximum and minimum scour depths in outer bank with 0 and 90 degrees angles respectively. Also, by increase of air discharge ratio the maximum scour depth was decreased.

Keywords: Rivers bend, Scour, Air -bubble screen, Secondary flow, Flow pattern.