

اثر جت هیدرولیکی هم فاز بر کاهش آبستگي در قوس 180 درجه رودخانه‌ها

زينب تامرادی¹، جواد احدیان^{2*}، محسن نجارچی³، هوشنگ حسونی زاده⁴ و محمد مهدی نجفی زاده⁵

- 1- دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی، گروه عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
- 2- دانشیار، دانشکده مهندسی علوم آب، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- 3- استادیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
- 4- استادیار، معاون مطالعات پایه و طرح‌های جامع منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران
- 5- استاد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

*ja_ahadiyan@yahoo.com

(دریافت مقاله: 97/4/18؛ پذیرش مقاله: 97/9/26)

چکیده- در این تحقیق اثر جت هیدرولیکی هم فاز بر کاهش آبستگي در قوس رودخانه‌ها بررسی شد. در روش مورد نظر یک لوله روزنه‌دار در امتداد قوس و نزدیک به دیواره بیرونی روی بستر قرار گرفته و از دو انتهای لوله فشار آب، به جریان درون قوس تزریق می‌شود. هدف اصلی از این پژوهش ایجاد یک صفحه آبی در مقابل با جریان ثانویه ایجاد شده در قوس و ممانعت از رسیدن آن به ساحل خارجی می‌باشد. نتایج نشان داد، محل وقوع ماکزیمم عمق آبستگي آزمایش‌های شاهد از نزدیکی دیواره خارجی قوس به میانه‌های مقطع عرضی در آزمایش‌های اصلی انتقال یافت. از طرفی میزان ماکزیمم عمق آبستگي با افزایش فاصله روزنه‌های روی لوله کاهش یافت. همچنین میزان ماکزیمم عمق آبستگي، با کاهش فاصله لوله از دیواره خارجی قوس کاهش یافت. از سوی دیگر نتایج نشان داد که میزان ماکزیمم اعماق آبستگي برای مقاطع 90، 130 و 175 درجه قوس به ترتیب به میزان 60، 64 و 87 درصد کاهش یافت.

کلیدواژگان: جت هیدرولیکی هم فاز، قوس رودخانه‌ها، عمق آبستگي

1- مقدمه

داخلی و رسوب‌گذاری در این منطقه و ایجاد سواحل جدید¹ می‌شود. ورود جریان به قوس باعث تغییرات مورفولوژی بستر و دیواره‌ها در محل قوس شده، محل تجمع خطوط جریان به تدریج در اثر نیروی گریز از مرکز، از خم داخلی به مرکز، سپس به دیواره خارجی خم انتقال می‌یابد. در نتیجه این الگوی جریان، خط القعر از وسط رودخانه در مسیر مستقیم به دیواره خارجی در قوس

جریان در رودخانه‌ها در مسیر حرکت خود علاوه بر عبور از مسیرهای مستقیم، از مسیرهای قوسی با الگوی پیچیده نیز می‌گذرد. در اثر اندرکنش بین جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی پروفیل سرعت در عمق، الگوی جریانی به نام حلزونی تشکیل می‌شود که باعث ایجاد آشفتگی شدید و توپوگرافی نامنظم می‌گردد. این الگو باعث افزایش سرعت در قوس خارجی و فرسایش آن و کاهش سرعت در جداره

¹ Point Bar

زیستی در شرایط استفاده از صفحه حباب هوا است. باتوجه به تزریق هوا به عنوان فاز متفاوت به درون آب در این روش، ممکن است هوادهی مستمر در محل موجب تغییرات خصوصیات آب از جمله میزان اکسیژن محلول در آب، دمای آب و ... گردد که احتمال بروز مشکلاتی از قبیل رشد جلبک ها و گیاهان آبی، عدم سازگاری شرایط بوجود آمده با اکوسیستم موجود و گونه های گیاهی و جانوری بومی منطقه و ... وجود خواهد داشت. لذا تکنیک ارائه شده جت هیدرولیکی هم فاز کلیه مزایای استفاده از روش صفحه حباب هوا از جمله سهولت و سرعت در اجرا، ارزان بودن، عدم نیاز به احداث سازه و پیشروی در عرض رودخانه و حفظ شرایط رودخانه را دارا می باشد. علاوه بر این مزایا، در بکارگیری روش جت هیدرولیکی هم فاز، باتوجه به تزریق آب به جای هوا و برداشت آب مورد نیاز از همان محل، انتظار می رود که تغییری به لحاظ فاز سیال، دما و خصوصیات شیمیایی نظیر تغییر اکسیژن محلول در آب، اثرات سوء زیست محیطی و ... در منطقه رخ ندهد.

باتوجه به اینکه پیش بینی می گردد از نظر تئوری، عوامل متعددی از جمله دبی تزریق آب به درون لوله تزریق، تعداد و فاصله نازل ها از یکدیگر، فاصله کارگذاری لوله تزریق آب از دیواره خارجی، دبی جریان اصلی و غیره بر میزان تاثیرگذاری این روش در کنترل آبشستگی تأثیرگذار باشد، بررسی میزان تأثیر پارامترهای ذکر شده در شناخت جزئیات استفاده از این روش ضروری و مستلزم بررسی آزمایشگاهی بوده و بر این اساس در تحقیق حاضر، با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی 180 درجه، به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی قوس و پارامترهای مؤثر در روش جت هیدرولیکی هم فاز تحت شرایط آب زلال⁵ در محدوده سرعتی آستانه حرکت پرداخته خواهد شد.

Dugué et al. (2012a) صفحه حباب هوا را به عنوان یک عامل بازدارنده جهت کاهش فرسایش در قوس کانال های باز، معرفی کردند. نتایج ایشان نشان داد که در مقاطع مورد بررسی 90 و 180 درجه، گودال آبشستگی از دیواره بیرونی به میانه مقطع عرضی منتقل می شود.

انتقال می یابد (جراح زاده و شفعا بیجستان، 1391). آبشستگی در دیواره بیرونی ممکن است پایداری دیواره بیرونی را به خطر بیندازد و رسوب گذاری در دیواره داخلی ممکن است عرض ناپیری را کاهش دهد (Dugué et al., 2012). در حال حاضر چندین تکنیک برای مقابله با آبشستگی و تغییرات مورفولوژی در قوس خارجی رودخانه ها وجود دارد که که از آن جمله می توان به مواردی از جمله احداث آبشکن¹، احداث دایک²، پوشش گیاهی، پوشش سنگ چین³، اضافه کردن پره های تحتانی (شهبابی، 1394)، استفاده از روش صفحه حباب هوا⁴ (Dugué et al., 2011) و ... اشاره کرد. استفاده از روش های معمول مقابله با فرسایش قوس ها از قبیل ساحل سازی و استفاده از آبشکن ها، مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد بوده و موجب تغییراتی در شرایط محیط زیستی محل اجرا می گردند. همچنین عملیات ساختمانی این روش ها بعضاً بدلیل واقع شدن در مناطق خاص (از قبیل مناطق مرزی و یا باتلاقی و...) با مشکلاتی روبرو خواهد شد. بعلاوه ایجاد سازه هایی نظیر آبشکن ها در رودخانه هایی که محل تردد کشتی ها و سایر شناورها باشد، امکان پذیر نبوده و تنها در شرایط ویژه (عریض بودن رودخانه به حد کافی) قابل استفاده می باشد. لذا در چنین شرایطی استفاده از روش های سریع و ارزان، مورد توجه قرار می گیرد که از این دست روش ها می توان به روش جدید استفاده از صفحه حباب هوا می باشد که بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده، این روش می تواند به منظور اصلاح مورفولوژی رودخانه ها مورد استفاده قرار گیرد (Dugué et al., 2013؛ Dugué et al., 2014). مزیت دیگر این روش عدم نیاز به احداث سازه و پیشروی در عرض رودخانه می باشد. همچنین در این روش، مانع ایجاد شده در مقابل جریان ثانویه در قوس صلب نبوده و سیال بودن آن موجب می گردد که خللی در بهره برداری از رودخانه از جمله انجام عملیات کشتیرانی ایجاد نشود. لیکن یکی از دغدغه هایی که در استفاده از این روش مطرح است، عدم وجود ارزیابی دقیق از شرایط محیط

¹ Spur Dyke

² Dyke

³ Dyke

⁴ Air-bubble screen

⁵ Clear-water

داد که در جریان مستقیم، حباب ایجاد شده توسط دوران عرضی جریان، گستردگی حدود 4 برابر عمق آب دارد اما در جریان انحنا دار این گستردگی حدود 3 برابر عمق آب می‌باشد.

(2013) Soltani-Gerdefaramarzi et al. در پژوهشی به بررسی تاثیر استفاده از جت آب در کنترل آبستگي اطراف پایه پل پرداختند. نتایج ایشان نشان داد بهینه ترین شرایط از نظر کاهش عمق آبستگي اطراف پایه پل، برای کمترین عمق جریان آب، بالاترین میزان جریان جت آب و زاویه 90 درجه بین جت ها رخ داده است.

(2015) Yarahmadi et al. در پژوهشی به بررسی اثر کارگذاری صفحات مثلی بر توپوگرافی بستر در کانال قوسی پرداختند و آزمایشات خود را برای فواصل مختلف بین صفحات (4، 5، 6 و 8 برابر طول مؤثر صفحات) انجام دادند و همچنین مؤلفه های سه بعدی سرعت نیز در شرایط با و بدون صفحات اندازه گیری شدند. نتایج نشان داد که صفحات باعث انحراف جریان از ساحل بیرونی به ساحل داخلی و تشکیل خط القعر در قوس داخلی شده‌اند. همچنین حداکثر عمق آبستگي با افزایش فاصله بین صفحات و افزایش عدد فرود افزایش یافته است و فاصله 5 برابر طول مؤثر یا کمتر فواصل بهتری هستند.

(2017) Nath et al. در مقاله‌ای به بررسی آزمایشگاهی آبستگي موضعی اطراف آبشکن در کانال باز پرداختند و آزمایشات خود را برای مقادیر مختلف $(B-L/B)$ (نسبت اختلاف بین عرض کانال و طول آبشکن به عرض کانال) و زوایای انحراف مختلف آبشکن‌ها (60، 80 و 90 درجه) نسبت به جهت جریان انجام دادند. نتایج نشان داد که تمامی پارامترهای نسبی آبستگي (عمق، طول و عرض سوراخ آبستگي نسبت به عمق جریان) با افزایش عدد فرود و کاهش $(B-L/B)$ ، افزایش می‌یابند و با افزایش زاویه انحراف آبشکن‌ها کاهش می‌یابند. از سوی دیگر برای نسبت‌های یکسان از $(B-L/B)$ ، کمترین عمق آبستگي برای زاویه انحراف 60 درجه نشان داده شده است.

(2017) Dey et al. در پژوهشی به بررسی فرسایش دیواره و حفاظت از آن با استفاده از پره‌های مستغرق قرار گرفته در زاویه بهینه یک فلوم 180 درجه پرداختند. پره‌ها در

Dugué et al. (2012b) به بررسی الگوهای جریان ناشی از صفحه حباب هوا پرداختند. این محققان نشان دادند که صفحه حباب هوا می‌تواند الگوی جریانی را ایجاد کند که باعث اصلاح مورفولوژی بستر شود. از طرفی اندازه‌گیری سرعت نشان داد که صفحه حباب هوا می‌تواند باعث اصلاح جریان طبیعی قوس شود. (2012) Dugué et al. به بررسی کاهش آبستگي قوس بوسیله صفحه حباب هوا پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که صفحه حباب هوا به طور قابل ملاحظه‌ای مورفولوژی را اصلاح می‌کند. از طرفی مکان ماکزیمم عمق آبستگي قوس بین زوایای 60 و 90 درجه می‌باشد که از قوس بیرونی به سمت میانه قوس انتقال می‌یابد.

(2013) Dugué et al. کاهش آبستگي قوس را در خم 193 درجه، با استفاده از روش صفحه حباب هوا بررسی کردند. اندازه‌گیری سرعت در مقطع عرضی 70 درجه قوس نشان داد که الگوی جریان ناشی از حباب، باعث انتقال جریان‌های ثانویه نزدیک قوس بیرونی به سمت داخل قوس می‌شود و از قدرت آن‌ها نیز می‌کاهد. همچنین کاهش ماکزیمم عمق آبستگي به میزان 50 درصد می‌باشد. (2014) Dugué et al. به بررسی تأثیر الگوهای جریان بر مورفولوژی بستر بوسیله صفحه حباب هوا پرداختند و اندازه و قدرت سلول جریان ناشی از حباب در بستر متحرک را با بستر غیر متحرک مقایسه کردند که نتایج ایشان نشان داد، اندازه و قدرت سلول جریان در بستر متحرک بزرگتر از بستر غیر متحرک می‌باشد.

(2006) Wijibenga et al. در مقاله‌ای به بررسی توزیع سرعت و جریان‌های ثانویه در قوس کانال‌های باز، به روش صفحه حباب هوا پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با توجه به وجود جریان ناشی از حباب‌های صفحه حباب هوا، هسته ماکزیمم تنش برشی بستر به سمت قوس درونی تغییر جهت می‌دهد که باعث افزایش عرض ناوبری می‌شود. (2008) Blanckaert et al. در مقاله‌ای به بررسی توزیع سرعت و تنش برشی بستر در کانال‌های باز مستقیم و قوسی به روش صفحه حباب هوا پرداختند. خروج هوا از سوراخ‌های لوله متخلخل باعث تغییر الگوی جریان می‌شود. مطالعات اولیه آزمایشگاهی ایشان نشان

در رابطه (2) پارامتر $(\frac{B}{Y})$ به دلیل ثابت بودن عرض فلوم (60 سانتی متر) و عمق جریان (10 سانتی متر)، پارامتر $(\frac{d_{50}}{Y})$ به دلیل ثابت بودن قطر متوسط ذرات بستر (1 میلی متر) و عمق جریان، پارامتر $(\frac{d_0}{Y})$ به دلیل ثابت بودن قطر روزنه ها (2 میلی متر) و عمق جریان، پارامتر $(\frac{L}{Y})$ به دلیل ثابت بودن طول لوله متخلخل (7 متر) و عمق جریان و پارامتر $(\frac{\rho_s}{\rho})$ به دلیل ثابت بودن چگالی رسوب و چگالی آب حذف شده اند. Re که همان عدد رینولدز است نشان دهنده تأثیر نیروهای لزجت در میزان آبشستگی می باشد. به دلیل بزرگتر از 2000 بودن عدد رینولدز، جریان آشفته در نظر گرفته می شود و از آنجا که در جریان های آشفته تأثیر نیروهای لزجت در مقایسه با نیروهای اینرسی ناچیز می باشد، بنابراین می توان تأثیر عدد رینولدز را نادیده گرفت و آن را از معادله حذف کرد. با حذف پارامترهایی که در این پژوهش ثابت فرض شده اند و همچنین پارامترهایی که از اهمیت کمتری برخوردارند رابطه نهایی به صورت رابطه (3) حاصل شد:

$$\frac{Z}{Y} = f\left(\frac{d}{Y}, \frac{D}{Y}, Fr, \frac{q}{Q}, \theta\right) \quad (3)$$

2-2- مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی بکار گرفته شده یک فلوم 180 درجه با سطح مقطع مستطیلی با عرض 60 سانتی متر و نسبت (R/B) 3/5 می باشد که آن را در گروه قوس های کند قرار می دهد. ابعاد بخش های مختلف فلوم شامل حوضچه ورودی، حوضچه آرامش، حوضچه رسوبگیر و حوضچه خروجی و همچنین تجهیزات بکار گرفته شده برای انجام آزمایشات در شکل 1 نشان داده شده است. رسوب مورد استفاده نیز ماسه سیلیس با قطر متوسط 1 میلی متر می باشد. سازه حفاظتی بکار برده شده نیز لوله روزنه داری است که در طول قوس خارجی فلوم بر روی رسوبات قرار گرفته است. فاصله لوله از دیواره خارجی قوس دارای مقادیر 2/5 و 5 سانتی متر، فاصله روزنه های روی لوله دارای مقادیر 3، 4 و 5 سانتی متر و قطر روزنه های روی لوله 2 میلی متر می باشد. شکل 2 نحوه کار گذاشتن سازه

زوایای 10، 15، 20، 30 و 40 درجه نسبت به مؤلفه مماسی جریان و فاصله 75 سانتی متر نسبت به هم قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ماکزیمم آبشستگی بین زوایای 120 تا 180 درجه قوس خارجی روی داده است. همچنین زاویه 15 درجه، زاویه بهینه در کاهش تولید جریان های ثانویه و در نتیجه کاهش آبشستگی قوس بیرونی می باشد.

هدف اصلی از این پژوهش بررسی تأثیر جت آب بر روی کاهش آبشستگی در قوس 180 درجه رودخانه ها با در نظر گرفتن متغیرهای فاصله روزنه های تعبیه شده بر روی لوله تزریق و فاصله لوله تزریق از دیواره خارجی قوس می باشد. قابل ذکر است که به عنوان نوآوری، روش جت هیدرولیکی هم فاز جهت کاهش آبشستگی در قوس 180 درجه رودخانه ها برای اولین بار در این پژوهش بکار گرفته شده است.

2- مواد و روش ها

2-1- پارامترهای وابسته و آنالیز ابعادی

پارامترهای متعددی در عملکرد لوله روزنه دار جهت کاهش آبشستگی در قوس خارجی و حفاظت سواحل مؤثرند. به منظور یافتن رابطه بین عوامل مؤثر بر آبشستگی، تحلیل ابعادی روی پارامترهای مؤثر انجام شده است. عوامل مؤثر در این زمینه، طبق رابطه (1) عبارتند از:

$$f(B, Y, Q, q, Z, g, \rho, \rho_s, \mu, d_{50}, L, d_0, d, D, \theta) = 0 \quad (1)$$

پارامترهای این رابطه شامل B عرض فلوم، Y عمق جریان، Q دبی اصلی جریان، q دبی تزریق آب، Z ماکزیمم عمق آبشستگی، g شتاب ثقل، ρ چگالی سیال، ρ_s چگالی رسوب، μ ویسکوزیته دینامیکی، d_{50} قطر متوسط ذرات بستر، L طول لوله روزنه دار، d_0 قطر روزنه ها بر روی لوله، d فاصله روزنه ها، D فاصله لوله روزنه دار از دیواره خارجی قوس و θ زاویه قوس کانال می باشند. با ترکیب هر یک از متغیرهای باقیمانده و سه متغیر تکراری پارامترهای بی بعد به شکل معادله (2) حاصل شدند.

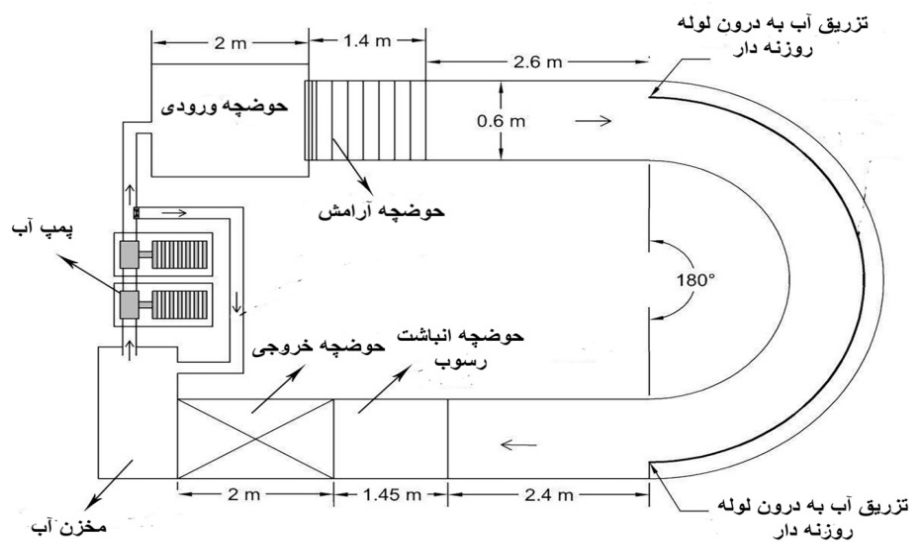
$$f\left(\frac{Z}{Y}, \frac{B}{Y}, \frac{d_{50}}{Y}, \frac{d}{Y}, \frac{d_0}{Y}, \frac{D}{Y}, \frac{L}{Y}, Fr, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{q}{Q}, Re, \theta\right) = 0 \quad (2)$$

آزمایش‌ها 10 سانتی متر در نظر گرفته شد. آزمایش‌های این تحقیق در حالت هم فاز (تزریق جت آب) انجام شدند. در هر آزمایش ابتدا رسوبات بستر در سرتاسر طول قوس پخش و توسط تسطیح کن صاف شدند. سپس دریچه انتهایی فلوم در حالت کاملاً بسته قرار گرفته و آب به آرامی وارد فلوم شد. پس از رسیدن عمق جریان به ارتفاع لازم و سپس تنظیم دبی، دریچه انتهایی جهت تنظیم ارتفاع آب در حد مورد نظر، باز گردید.

حفاظتی و شکل 3 تصویر قوس محل آزمایش را نشان می‌دهد.

3-2- روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها تحت شرایط آب زلال بدون تغذیه رسوب انجام شدند که برای حصول این شرایط عمق جریان به گونه‌ای تنظیم شد تا نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی کمتر از 95 درصد شود. از این رو عمق جریان در تمامی



شکل 1 مدل آزمایشگاهی



شکل 2 نحوه کارگذاشتن سازه حفاظتی



شکل 3 تصویر قوس محل آزمایش

ملاحظات قرار دارد. معادلات 4 و 5 معیارهای مربوطه می باشند.

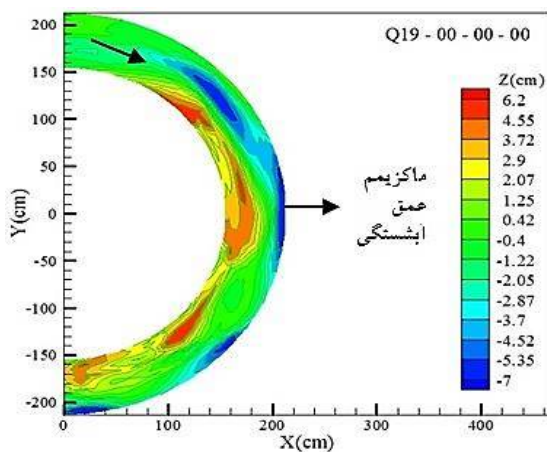
$$R_{e*} = \frac{u_* \times d_{50}}{\nu} > 70 \approx 80 \quad (4)$$

$$u_* = \sqrt{g Y s} \quad (5)$$

3- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

3-1- آزمایش شاهد

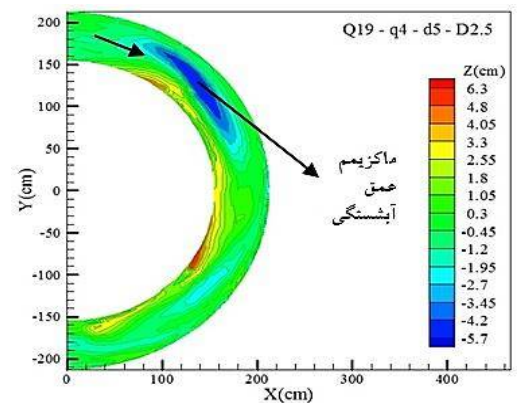
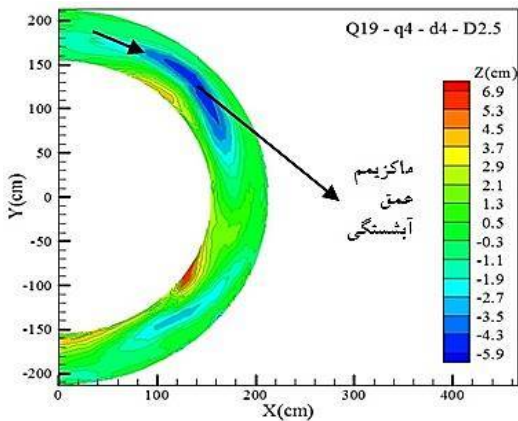
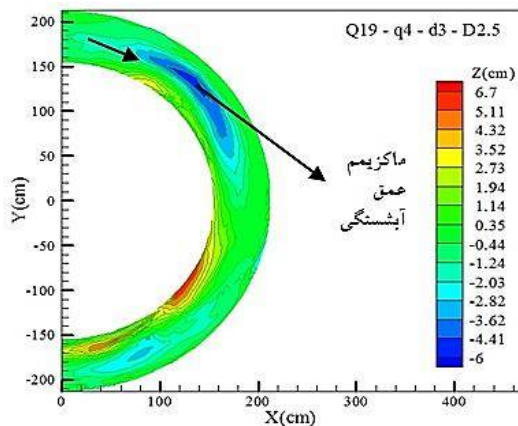
در شکل 4 نمودار توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی برای آزمایش شاهد با دبی ماکزیمم 19 لیتر بر ثانیه، پس از وقوع آبشستگی در شرایط بدون وجود سازه رسم شده است.



شکل 4 توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی آزمایش شاهد

زمان تعادل پیش‌بینی شده برای انجام آزمایش‌ها 3 ساعت در نظر گرفته شد. برای محاسبه زمان تعادل، یک آزمایش به مدت 12 ساعت و در حداکثر دبی (19 لیتر بر ثانیه) انجام شد و 85-90 درصد آبشستگی در این مدت زمان اتفاق افتاد. برای انجام آزمایشات، آب تحت فشار توسط پمپ آب با قدرت 1 کیلو وات، با دبی مشخص (برای هر آزمایش) از دو انتهای وارد لوله روزنه‌دار گردید و به جریان درون فلوم تزریق شد. مقدار دبی تزریق آب توسط روتامتر آب با دقت 2 درصد تعیین گردید. پس از اتمام آزمایش و حاصل شدن تعادل مورفولوژیکی و تخلیه آب، توپوگرافی بستر توسط فاصله سنج لیزری (هر 5 درجه در قوس و هر 3 سانتی متر در امتداد مقطع عرضی) برداشت شد و از داده‌های حاصله جهت تحلیل و مقایسه نتایج آزمایشات استفاده شد. دبی اصلی ورودی به فلوم دارای 3 مقدار (16، 17/5 و 19 لیتر بر ثانیه)، دبی تزریق آب دارای 3 مقدار (2، 3 و 4 متر مکعب بر ساعت) می باشد. انتخاب دبی‌های مینیمم بر اساس تأمین حداقل دبی جهت خروج سیال از تمامی روزنه‌ها و انتخاب دبی‌های ماکزیمم بر اساس محدودیت ابزار دقیق می باشد. محدوده عدد رینولدز در آزمایش‌های انجام شده بین $2/02 \times 10^5$ و $2/4 \times 10^5$ بدست آمد. با توجه به اینکه این مقادیر بیشتر از 2000 می باشند بنابراین جریان آشفته در نظر گرفته می شود. همچنین به دلیل بزرگتر از 70 بودن عدد رینولدز برشی رژیم جریان نیز در ناحیه زبر با شرایط کاملاً

خارجی قوس به میانه‌های آن و زوایای دیگری انتقال یافت که می‌تواند افزایش عرض نوابری را در پی داشته باشد. از طرفی با افزایش فاصله روزنه‌های روی لوله مقدار ماکزیمم عمق آبشستگی کاهش یافت (شکل 5).



شکل 5 توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی با تغییر فاصله روزنه‌های روی لوله

به دلیل اثرات انحنای قوس و هجوم جریان‌های ثانویه به قوس خارجی و همچنین عدم وجود سازه حفاظت آن، دیواره بیرونی قوس دچار فرسایش شده تا جایی که برای دبی اصلی 19 لیتر بر ثانیه ماکزیمم عمق آبشستگی در زاویه 90 درجه، به فاصله 0/5 سانتی‌متر از دیواره خارجی قوس و به میزان 7 سانتی‌متر است. از طرفی رسوبات جدا شده از دیواره خارجی، با تجمع نزدیک دیواره داخلی ایجاد تپه‌های رسوبی کرده و باعث کاهش عرض نوابری شده‌اند.

3-2-2- آزمایش‌های اصلی

از آنجایی که هدف از این پژوهش کاهش آبشستگی در قوس خارجی است، با کار گذاشتن سازه حفاظتی در آن محدوده و به کمک تزریق جت آب، جریان‌های ثانویه ناشی از حضور سازه بر جریان‌های ثانویه ناشی از انحنای قوس غلبه کرده و در نهایت آن‌ها را از دیواره خارجی دور کرده است و در نتیجه، ماکزیمم عمق آبشستگی در محل قوس خارجی کاهش یافته است. از طرفی مورفولوژی بستر اصلاح شده و افزایش عرض نوابری می‌تواند از نتایج مثبت دیگر حضور سازه باشد.

3-2-1- توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی و نمودارهای پروفیل طولی

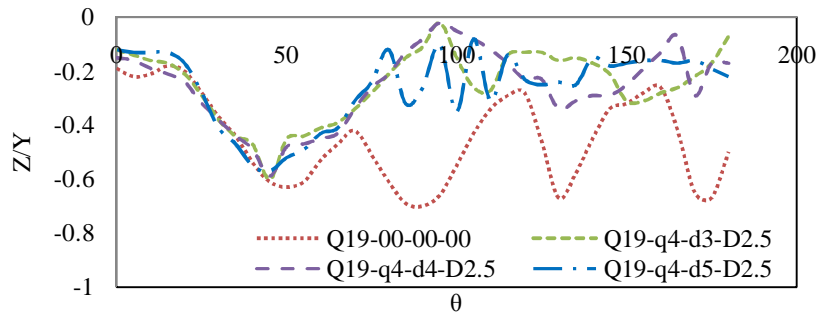
نرم افزار مهندسی Tecplot از مجموعه نرم‌افزارهای تخصصی می‌باشد که وظیفه نمایش و تحلیل داده‌های خروجی را دارد. در این پژوهش برای نمایش محل وقوع ماکزیمم اعماق آبشستگی (چاله‌ها) در طول فلوم در آزمایش‌های شاهد و اصلی، رسم نمودارهای توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی در شرایط با و بدون وجود سازه، توسط این نرم افزار انجام شده است.

در این بخش توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی و نمودارهای پروفیل طولی با در نظر گرفتن متغیر فاصله روزنه‌های 3، 4 و 5 سانتی‌متر روی لوله تزریق و در فاصله ثابت 2/5 سانتی‌متر لوله از دیواره رسم شده‌اند.

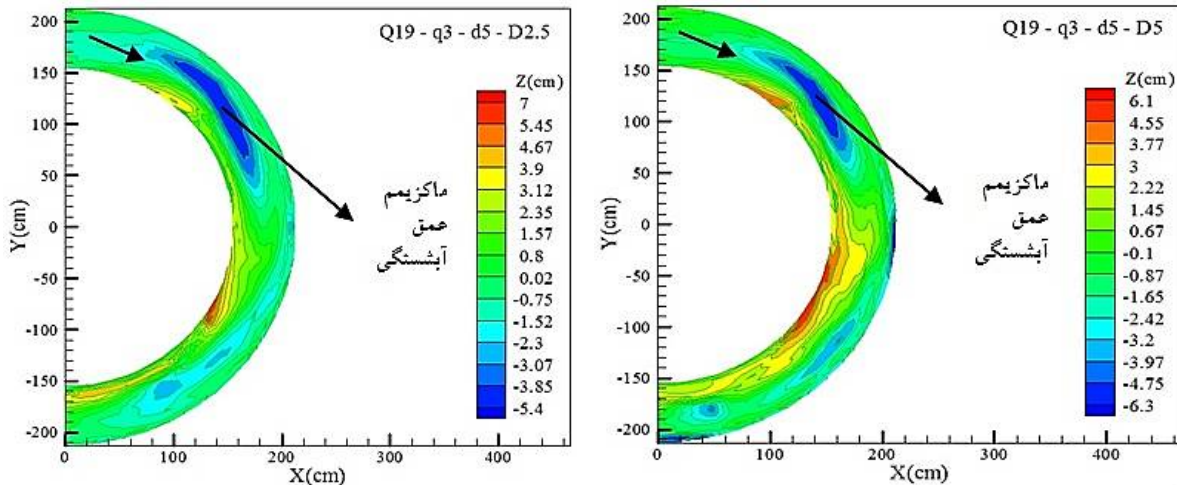
شکل 5 توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی و شکل 6 پروفیل طولی ماکزیمم اعماق آبشستگی نسبت به زاویه را برای دبی تزریق 4 متر مکعب بر ساعت نشان داده است. محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از نزدیکی دیواره

نمودارهای پروفیل طولی با در نظر گرفتن فواصل متغیر 2/5 و 5 سانتی متر لوله از دیواره و فاصله روزنه ثابت 5 سانتی متر روی لوله تزریق رسم شده‌اند. در شکل 7 توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی و شکل 8 نمودار پروفیل طولی ماکزیمم اعماق آبشستگی نسبت به زاویه را در آزمایشات با حضور سازه و برای دبی تزریق 3 متر مکعب بر ساعت نشان داده است.

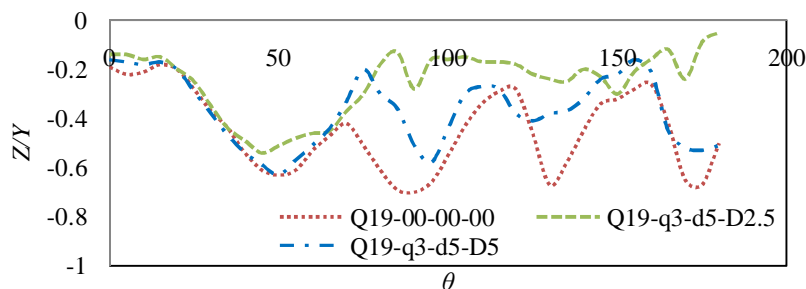
به این دلیل که برای لوله‌ای با طول ثابت با افزایش فاصله روزنه‌ها تعداد آن‌ها کاهش یافته و مقدار دبی تزریقی به درون لوله از تعداد روزنه‌های کمتری خارج شد و مقدار آن هنگام خروج از روزنه‌ها افزایش یافت و در نتیجه قدرت آن برای دور کردن جریان‌های ثانویه از قوس خارجی افزایش یافته و آبشستگی را به میزان بیشتری کاهش داده است. در این بخش توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی و



شکل 6 نمودار بی بعد پروفیل طولی ماکزیمم اعماق آبشستگی نسبت به زاویه با تغییر فاصله روزنه‌های روی لوله

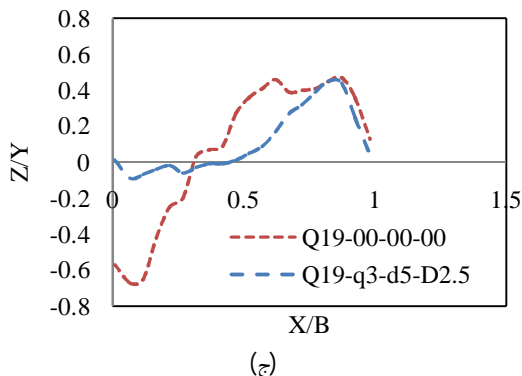
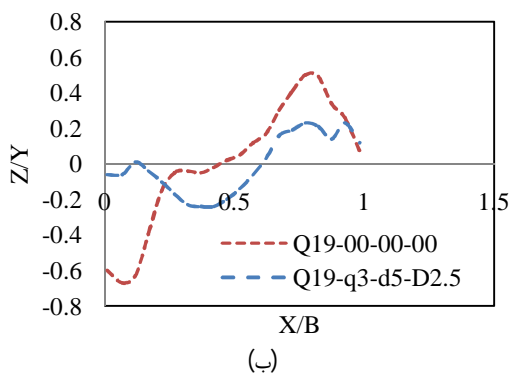
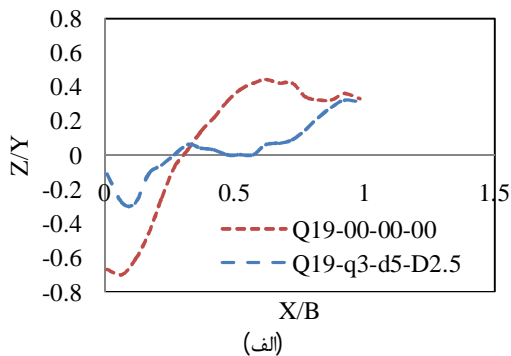


شکل 7 توپوگرافی بستر رسوبی دو بعدی با تغییر فاصله لوله از دیواره خارجی قوس



شکل 8 نمودار بی بعد پروفیل طولی ماکزیمم اعماق آبشستگی نسبت به زاویه با تغییر فاصله لوله از دیواره خارجی قوس

5 سانتی متر روی لوله و فاصله 2/5 سانتی متر لوله از دیواره رسم شده‌اند. نمودارهای پروفیل عرضی برای دبی تزریق $3 \text{ m}^3/\text{hr}$ (برای مقاطع الف) 90 درجه قوس، ب) 130 درجه قوس و ج) 175 درجه قوس نشان داده شده اند. نتایج مربوط به آزمایشات این بخش در جدول 1 نشان داده شده است.



شکل 9 نمودار بی بعد پروفیل عرضی ماکزیمم اعماق آبشستگی نسبت به فاصله عرضی الف) مقطع 90، ب) مقطع 130 و ج) مقطع 175 درجه

مقایسه نتایج آزمایش‌های شاهد و اصلی نشان داد که جریان‌های ثانویه‌ای که به دلیل انحنای قوس بوجود آمده‌اند، از دیواره خارجی قوس دور شدند که در نتیجه آن میزان حداکثر عمق آبشستگی در این آزمایشات نسبت به آزمایش شاهد و بخصوص در محل ایجاد چاله‌ها کاهش یافت. محل وقوع ماکزیمم عمق آبشستگی در تمامی آن‌ها از نزدیکی دیواره خارجی قوس در آزمایش شاهد، به میانه‌های قوس در آزمایشات اصلی انتقال یافت. انتقال محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از دیواره خارجی قوس به میانه‌های قوس و افزایش عرض ناوبری می‌تواند از پیامدهای مثبت دیگر حضور سازه باشد. از طرفی با کاهش فاصله لوله از دیواره خارجی قوس، مقدار ماکزیمم عمق آبشستگی کاهش یافت. به این دلیل که محل اثر جریان‌های ثانویه نزدیک دیواره خارجی قوس بوده و هر چه لوله به دیواره بیشتر نزدیک شود، توانایی دور کردن این جریان‌ها از دیواره بیشتر فراهم شود و در نتیجه مقدار ماکزیمم عمق آبشستگی کاهش بیشتری خواهد یافت. انتقال محل وقوع ماکزیمم ارتفاع تپه رسوبی به پایین دست قوس و نزدیک دیواره داخلی نیز در این شرایط اتفاق افتاد.

3-2-2- نمودارهای پروفیل عرضی

شکل 9 نمودارهای پروفیل عرضی بستر را برای نمایش چاله‌های ماکزیمم در دیواره قوس خارجی و کاهش آن‌ها در عرض پس از کارگذاشتن سازه حفاظتی، در آزمایش‌های شاهد و اصلی نشان داده است. نمودارها برای دبی اصلی ماکزیمم 19 لیتر بر ثانیه برای مقاطع 90، 130 و 175 درجه ترسیم شده است. انتخاب این مقاطع بر این اساس است که در دبی 19 لیتر بر ثانیه سه گودال آبشستگی عمیق در مقاطع 90، 130 و 175 درجه در آزمایش‌های شاهد به چشم می‌خورد که در توپوگرافی بستر و همچنین پروفیل طولی قابل مشاهده است. از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش کاهش آبشستگی در قوس خارجی می‌باشد، به بررسی تأثیر سازه حفاظتی در کاهش آبشستگی در این مقاطع پرداخته شده است. قابل ذکر است نمودارها برای بهترین حالت یعنی فاصله روزنه

جدول 1 نتایج مربوط به نمودارهای پروفیل عرضی

نام آزمایش	Q (l/s)	q_w (m ³ /hr)	θ (deg)	Z (cm)	Z/Y (-)	درصد کاهش ماکزیم عمق آبشستگی
Q19-00-00-00	19	-	90	-7	-0/7	
	19	-	130	-6/7	-0/67	
	19	-	175	-6/7	-0/67	
Q19-q3-d5-D2.5	19	3	90	-2/8	-0/28	60
	19	3	130	-2/4	-0/24	64
	19	3	175	-0/9	-0/09	87

مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است (Karbasi and Azamathulla, 2017). جزئیات مربوط به دسته بندی معادلات در جدول 2 نشان داده است.

$$\frac{Z}{Y} = \left[(-2.6\theta^2 - Fr)(\theta - \frac{q}{Q} - 5.4) \right] \left[Fr^3(\theta^3 + \frac{q}{Q} - 2.3) \right] \quad (6)$$

$$\frac{Z}{Y} = \frac{d}{y} \left[(-495.2Fr^7(\frac{q}{Q} - \theta)^2)((\frac{1}{\theta})^3 - (\frac{Fr\theta^2}{5.4})) \right] \quad (7)$$

$$\frac{Z}{Y} = \frac{Fr^3}{17.6 + \left[(7.3\frac{q}{Q} - 5.7)(\theta Fr - Fr + \theta) \right]} - 6.3Fr^3 \quad (8)$$

فرمول‌های ارائه شده برای 80% از داده‌های هر مقطع بدست آمد و از 20% بقیه داده‌ها برای صحت سنجی استفاده شد. نتیجه این صحت سنجی در شکل 10 آورده شده است. در واقع نمودارها مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده با استفاده از مدل‌های آماری (معادلات 6 تا 8)، را نشان داده است. پراکندگی کوچک بین داده‌ها قابل توجه است و نزدیکی نقاط به خط رگرسیون نشان از همبستگی مطلوب بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده دارد.

جدول 2 اندازه‌گیری‌های آماری معادلات پیش‌بینی شده

معدله	مقطع (درجه)	ضریب همبستگی (درصد)	خطای RMSE (درصد)	خطای MAE (درصد)
(6)	(0-60)	97	3	2
(7)	(60-120)	86	6	5
(8)	(120-180)	83	3	3

مقایسه نتایج آزمایشات نشان داد که میزان کاهش حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش‌های اصلی نسبت به شاهد برای مقطع 90 درجه 60 درصد، مقطع 130 درجه 64 درصد و مقطع 175 درجه 87 درصد برآورد شد. چنانچه پیشتر گفته شد، در واقع سازه حفاظتی سعی دارد که با ایجاد صفحه آبی، جریان‌های ثانویه را از قوس خارجی دور کند و تأثیر منفی ناشی از انحنا را در ورودی و خروجی قوس به حداقل ممکن برساند. از طرفی نتایج آزمایش‌ها، انتقال محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از قوس خارجی به مرکز فلوم را نشان داده است که می‌تواند افزایش عرض ناوبری را در پی داشته باشد.

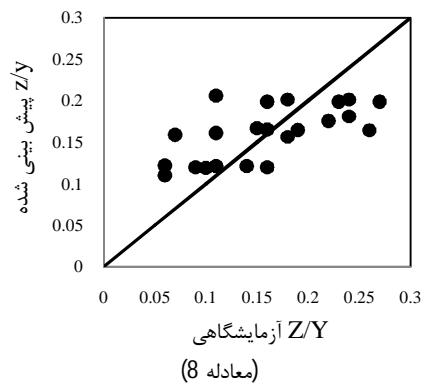
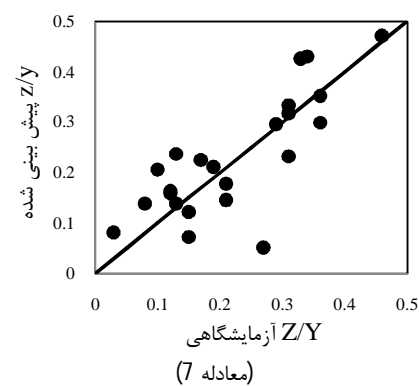
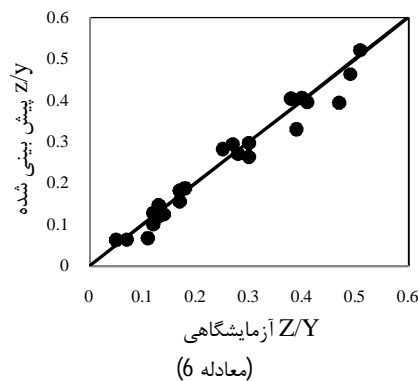
4- تحلیل آماری

در این پژوهش تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار GeneXpro انجام شده است که این نرم افزار از الگوریتم GEP برای تحلیل داده‌ها استفاده می‌کند. برنامه نویسی بیان ژن (GEP: gene expression programming) یک الگوریتم تکاملی است که برنامه‌ها یا مدل‌های کامپیوتری را ایجاد می‌کند. مزیت اصلی روش‌های مبتنی بر برنامه نویسی ژنتیک مانند GEP بر دیگر روش‌های نرم افزاری، توانایی آنها در پیش بینی معادلات ساده شده است بدون اینکه یک فرم قبلی از روابط موجود باشد و همچنین روشی مناسب برای مدل‌سازی فرایندهای غیرخطی و پیچیده می‌باشد (Azamathulla et al. 2013). با استفاده از این نرم افزار به ارائه 3 فرمول برای سه مقطع (0-60)، (60-120) و (120-180) درجه از قوس پرداخته شده است. برای بررسی دقت معادلات بدست آمده از دو روش آماری میانگین مطلق خطا (MAE) و مجذور میانگین

دیواره قوس خارجی کاهش یافته و به میانه‌های قوس انتقال یافت که می‌تواند افزایش عرض ناوبری را در پی داشته باشد. از طرفی با افزایش فاصله روزنه‌های روی لوله میزان ماکزیمم عمق آبشستگی کاهش یافت. همچنین مقدار ماکزیمم عمق آبشستگی با کاهش فاصله لوله از دیواره خارجی قوس کاهش یافت. از سوی دیگر نتایج نشان داد که میزان کاهش ماکزیمم اعماق آبشستگی در آزمایش‌های اصلی نسبت به شاهد برای مقطع 90 درجه 60 درصد، مقطع 130 درجه 64 درصد و مقطع 175 درجه 87 درصد برآورد شد. در واقع سازه حفاظتی سعی دارد که با ایجاد صفحه آبی، جریان‌های ثانویه را از قوس خارجی دور کند و تأثیر منفی ناشی از انحنا را در ورودی و خروجی قوس به حداقل ممکن برساند.

6- فهرست علائم

B	عرض کانال
D	فاصله لوله روزنه‌دار از دیواره خارجی قوس
d	فاصله روزنه‌ها
d_{50}	قطر متوسط ذرات بستر
d_o	قطر روزنه‌ها
F_r	عدد فرود
g	شتاب ثقل
L	طول لوله روزنه‌دار
Q	دبی اصلی ورودی به کانال
q_w	دبی تزریق آب
R	شعاع مرکزی قوس
R_{e^*}	عدد رینولدز برشی
s	شیب سطح آب
u^*	سرعت برشی
x	فاصله عرضی
Y	عمق جریان
Z	ماکزیمم عمق آبشستگی
θ	زاویه قوس کانال
μ	ویسکوزیته دینامیکی
ρ	چگالی آب
ρ_s	چگالی رسوبات
ν	ویسکوزیته سینماتیکی



شکل 10 مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج آماری (معادلات 6 تا 8)

5- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که پس از کارگذاشتن لوله روزنه‌دار و تزریق آب جریان‌های ثانویه ناشی از سازه حفاظتی بر جریان‌های ثانویه ناشی از انحنا غلبه کرده که در نتیجه آن میزان ماکزیمم عمق آبشستگی در امتداد

7- منابع

- Dugué, V. Blanckaert, K. Qiuwen, CH. and Schleiss, A. (2013). "Reduction of bend scour with an airbubble screen: Morphology and flow patterns". *J. Sediment Research*. 28(1), pp. 15-23.
- Dugué, V. Blanckaert, K. Chen, Q. and Schleiss, A. (2014). "Influencing Flow Patterns and Bed Morphology in Open Channels and Rivers by Means of an Air-Bubble Screen". *J. Hydraulic Eng-ASCE*. 141(2), 04014070.
- Dey, L. Barbhuiya, AK. and Biswas, P. (2017). "Experimental study on bank erosion and protection using submerged vane placed at an optimum angle in a 180° laboratory channel bend". *J. Geomorphology*. 283, pp. 32-40.
- Ghobadian, R. and Mohammadi, K. (2011). "Simulation of subcritical flow pattern in 180 uniform and convergent open-channel bends using SSIM 3-D model". *J. Water Science and Engineering*. 4(3), pp. 270-283.
- Karbasi, M. and Azamathulla, H. M. (2017). "Prediction of scour caused by 2D horizontal jets using soft computing techniques". *J. Ain Shams Engineering*. 8(4), pp. 559-570.
- Nath, D. and Misra, UK. (2017). "Experimental Study of Local Scour around Single Spur Dike in an Open Channel".
- Soltani-Gerdefaramarzi, S. Afzalimehr, H. Chiew, YM. and Lai, JS. (2013). "Jet to control scour around circular bridge piers". *J. Civil Engineering*. 40(3), pp. 204-212.
- Wijbenga, JHA. Schielen, R. Blanckaert, K. and Buschman, F. (2006). "Secondary flow and velocity redistribution by bubble screens in open channel bends". *The International Conference on Fluvial Hydraulics*. Lisbon., Portugal. p. 173.
- Yarahmadi, MB. And Bejestan, MS. (2016). "Sediment management and flow patterns at river bend due to triangular vanes attached to the bank". *J. Hydro-environment Research*. 10, pp. 64-75.
- جراح زاده، ف. و شفافی بجستان، م. (1391). "بررسی آزمایشگاهی وضعیت خط القعر تحت تاثیر وجود سرریز مستغرق در خم 90 درجه تند"، فصلنامه پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، 97: ص.ص. 17-29.
- شهایی، م. (1394). "بررسی آزمایشگاهی اثر نفوذپذیری و فاصله بر روی ابعاد آبشستگی اطراف آبشکن‌های نفوذپذیر در قوس 90 درجه ملایم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- Blanckaert, K. Buschman, FA. Schielen, R. and Wijbenga, JHA. (2008). "Redistribution of velocity and bed-shear stress in straight and curved open channels by means of a bubble screen: Laboratory experiments". *J. Hydraulic Eng-ASCE*. 134(2), pp. 184-195.
- Dugué, V. Blanckaert, K. and Schleiss, A. (2011). "Influencing bend morphodynamics by means of an air-bubble screen-Topography and velocity field". *Proc. of 7th IAHR Symposium on River, Costal and Estuarine Morphodynamics RCEM2011*.
- Dugué, V. Schleiss, A. and Blanckaert, K. (2012). "Bend scour reduction induced by an air-bubble screen under live-bed conditions". *Proc. of the International conference on fluvial Hydraulics*.
- Dugué, V. Blanckaert, K. and Schleiss, A. (2012a). "An Air-Bubble Screen Used as a countermeasure to Reduce Erosion in Open-Channel bends". *Proc. of 6th International Conference on Scour and Erosion.*, Paris, france. pp. 519-529.
- Dugué, V. Blanckaert, K. and Schleiss, A. (2012b). "Flow patterns induced by a bubble screen in a sharply curved flume based on Acoustic Doppler Velocity Profiler measurements". *Proc. of 8th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*. Dresden., Germany. pp. 29-32.