

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی آزمایشگاهی الگوی آبشستگی پیرامون گروه پایه سه تایی واگرا-عمودی و همگرا-عمودی مستقر در قوس 180 درجه تند

لیلا اقبال نیک¹، محمد واقفی^{2*}، محمدرضا گلبهار حقیقی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

2- دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

3- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

vaghefi@pgu.ac.ir

چکیده - الگوی غالب رودخانه‌ها در پلان بصورت پیچانرودی می‌باشد. با استقرار پایه‌های پل در رودخانه یک سلسله جریان‌های گردابی ایجاد می‌شود. این گردابه‌ها عامل اصلی آبشستگی به حساب می‌آیند که در دراز مدت باعث ایجاد چاله آبشستگی در محل پایه پل می‌شوند. آبشستگی موضعی عامل اصلی خرابی پل‌ها در سراسر جهان می‌باشد. از آنجا که رودخانه‌های پیچانرود متداول‌ترین نوع رودخانه‌ها در پلان می‌باشند، در این تحقیق به مطالعه آبشستگی حول گروه پایه سه تایی واگرا-عمودی و گروه پایه سه تایی همگرا-عمودی در موقعیت 90 درجه در امتداد جریان و در صفحه عمود بر جهت جریان پرداخته شده است. بدین منظور آزمایش‌هایی در کانال با قوس 180 درجه تند (نسبت شعاع مرکزی قوس به عرض کانال 2) در شرایط آستانه حرکت و با رسوبات بستر با قطر متوسط 1/5 میلی‌متر انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در انتهای آزمایش در هر دو گروه پایه سه تایی همگرا-عمودی و واگرا-عمودی در حالت استقرار در جهت جریان، آبشستگی حول پایه اول کج و پایه دوم عمودی از مقادیر یکسانی برخوردارند. همچنین تغییرات بستر در حالت استقرار عمود بر جهت جریان نسبت به حالت در امتداد جریان بیشتر شد. بیشینه عمق آبشستگی در گروه پایه‌های همگرا-عمودی از گروه پایه واگرا-عمودی با استقرار در صفحه عمود بر جهت جریان، حدود 20 درصد بیشتر می‌باشد.

کلید واژگان: آبشستگی، گروه پایه پل، قوس 180 درجه، پایه عمودی، پایه کج.

1- مقدمه

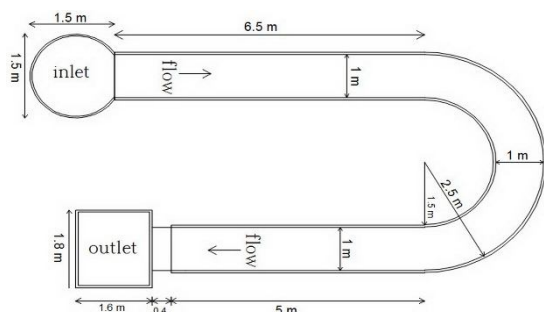
Dargahi (1987) بوده است. از عوامل مهم ایجاد آبشستگی پیرامون پایه پل می‌توان به گردابه نعل اسبی در جلو و گردابه برخاستگی در پشت پایه اشاره نمود. با کاربرد گروه پایه، الگوی جریان مذکور پیچیده‌تر شده و در نتیجه فرایند آبشستگی با تغییراتی مواجه می‌گردد. شکل هندسی و موقعیت پایه نسبت به امتداد جریان، تعداد و فواصل پایه‌ها و میزان تنگ شدگی مقطع، فرایند آبشستگی حول گروه پایه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

موقعیت قرارگیری پایه‌های پل در رودخانه و حفاظت از پایه‌ها در برابر آبشستگی که به شکست سازه منجر می‌شود، همواره مورد توجه مهندسان رودخانه بوده است. با قرارگیری پایه منفرد در مسیر جریان، الگوی جریان پیچیده‌ای پیرامون آن ایجاد می‌شود که موضوع تحقیق محققین بسیاری از جمله (Melville (1975، Raudkivi (1983، Cheiw and Melville (1987، and Ettema (1983)

پایه‌های پل در قوس صورت نگرفته است. هدف از انجام آزمایش‌ها بررسی تأثیر گروه پایه‌های سه تایی واگرا-عمودی و همگرا-عمودی بر سیستم‌های گردابی و نحوه جابجایی مصالح، تغییرات توپوگرافی بستر، با استقرار گروه پایه سه تایی در ساحل داخلی و خارجی قوس و میزان آبشستگی موضعی حول پایه‌های پل می‌باشد. همچنین به منظور بررسی تأثیر قرار گیری پایه‌های پل نسبت به امتداد جریان نیز گروه سه تایی پایه‌های پل در دو حالت در امتداد جریان و عمود بر جهت جریان در موقعیت 90 درجه قرار گرفتند.

2- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خلیج فارس بوشهر انجام شده که پلان آن در شکل 1 مشاهده می‌گردد. سطح مقطع این کانال مستطیلی با عرض 1 متر و ارتفاع 0/7 متر است. طول مسیر مستقیم کانال در بالادست و پایین دست به ترتیب 6/5 و 5 متر می‌باشد. شعاع مرکزی کانال 2 بوده و این قوس را در دسته قوس‌های تند قرار می‌دهد. برای انجام آزمایش‌ها قطر پایه‌ها 5 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. زاویه کج شدگی پایه‌ها نیز 21 درجه انتخاب شد. از رسوباتی از جنس سیلیس با قطر متوسط 1/5 میلی‌متر و انحراف معیار 1/14 استفاده شد. بستر در تمام طول کانال به ارتفاع 30 سانتی‌متر با رسوبات پوشانده شد. آزمایشات در شرایط آستانه حرکت انجام شد. با دبی 70 لیتر بر ثانیه، عمق جریان 18 سانتی‌متر بدست آمد.



شکل 1 پلان کانال آزمایشگاهی

اولین تحقیقات انجام شده در زمینه گروه پایه‌ها مربوط به Hannah (1980) و Nazariha (1996) می‌باشد. ایشان مطالعات خود را حول آبشستگی موضعی گروه پایه پل عمودی در مسیر مستقیم انجام داده‌اند.

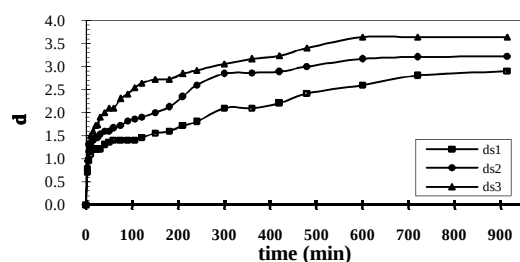
Bozkus and Cesme (2010) به بررسی اثر پایه‌های پل کج دوتایی بر عمق آبشستگی موضعی پرداختند. نتایج نشان داد که عمق آبشستگی اطراف پایه پل کج نسبت به پایه پل عمودی کمتر بود. همچنین عمق آبشستگی در پایه پل دوتایی نسبت به تک پایه کاهش پیدا کرد. Beg and Beg (2014) به منظور بررسی تأثیر گروه پایه پل با اندازه نابرابر و چیدمان پشت سر هم بر آبشستگی و حفره آبشستگی، در یک کانال مستقیم آزمایش‌هایی انجام دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که وجود گروه پایه پل در کاهش آبشستگی مؤثر است. از جمله تحقیقات انجام شده حول پایه‌های کج در ایران توسط Vaghefi et al. (2015) و Vaghefi et al. (2016) انجام شده است. Vaghefi et al. (2015) تأثیر کج شدگی پایه دایره‌ای در مسیر مستقیم، در صفحه عمود بر جریان بر حداکثر عمق و سایر پارامترهای حفره آبشستگی را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین Vaghefi et al. (2016) به بررسی آبشستگی موضعی پایه استوانه‌ای کج با دو قطر و زاویه کج شدگی مختلف پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش زاویه کج شدگی پایه سبب کاهش عمق آبشستگی می‌گردد. اگر چه الگوی غالب رودخانه‌ها بصورت پیچانوردی می‌باشد، اما آبشستگی پایه پل در آن کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. آبشستگی موضعی پیرامون پایه منفرد عمودی در قوس توسط Emami et al. (2008) و Masjedi et al. (2010) بررسی شده است. همچنین Khajeh et al. (2017) در قوس 180 درجه به مقایسه آبشستگی ناشی از پایه کج و عمودی پرداختند. ایشان جهت کج شدگی پایه‌ها را به سمت بالادست، پایین دست و دیواره‌ها در نظر گرفتند. نتایج نشان می‌دهد حداکثر آبشستگی در پایه کج نسبت به پایه عمودی، تحت تأثیر جهت کج شدگی افزایش یا کاهش داشته است.

رودخانه‌های پیچانورد متداول‌ترین نوع رودخانه‌ها در پلان می‌باشند، اما مطالعات جامعی در زمینه آبشستگی گروه

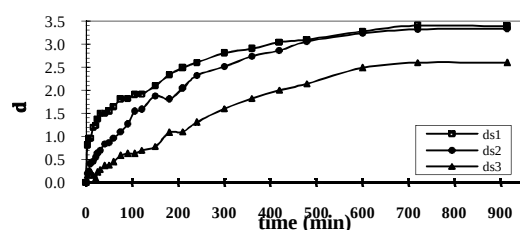
3- نتایج و بحث

مشاهدات و نتایج آزمایش‌ها در چند بخش آورده شده است.

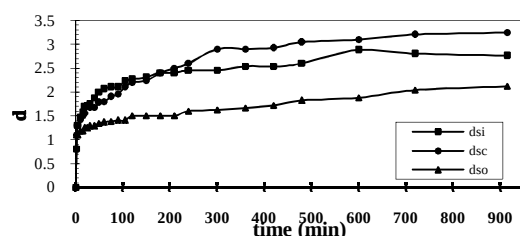
بیشینه عمق آبشستگی پیرامون هر پایه در فواصل زمانی مختلف اندازه‌گیری شده است. شکل 4 تغییرات زمانی بیشینه عمق آبشستگی حول پایه‌ها را نشان می‌دهد.



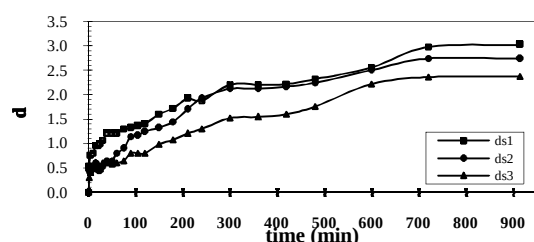
الف - CVT



ب - CVS



ج - DVT



د - DVS

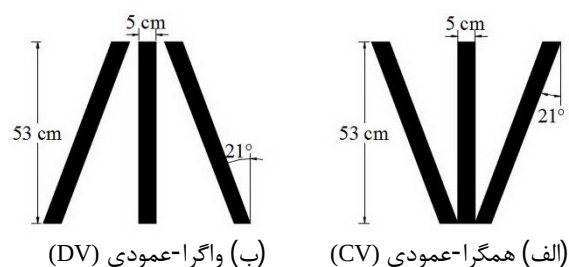
شکل 4 تغییرات عمق آبشستگی در آزمایش گروه سه تایی پایه‌های پل واگرا-عمودی و همگرا-عمودی مستقر در موقعیت 90 درجه

همان‌طور که در شکل 4-الف مشاهده می‌شود در گروه پایه CVT مکان بیشینه عمق آبشستگی از ابتدا تا انتهای

برای محاسبه زمان انجام آزمایش‌ها، آزمایش زمان تعادل انجام شد. بدین منظور تک پایه عمودی با قطر 5 سانتی متر در موقعیت 90 درجه قرار گرفت. پس از مدت زمان 44 ساعت چاله آبشستگی به تعادل رسید. زمان تعادل بر اساس معیار Chiew (1992) انتخاب شد. زمان تعادل نسبی معادل مدت زمانی که عمق بیشینه آبشستگی به 96 درصد عمق بیشینه آبشستگی در زمان تعادل رسیده بود، انتخاب شد. این زمان معادل 15 ساعت محاسبه گردید.

شکل 2 نحوه چیدمان پایه‌ها را نشان می‌دهد. پایه‌ها با توجه به جهت استقرار به صورت زیر نامگذاری شده‌اند: پایه‌های پل واگرا-عمودی در جهت عمود بر جریان (DVT^1)، پایه‌های پل واگرا-عمودی در جهت جریان (DVS^2)، پایه‌های پل همگرا-عمودی در جهت عمود بر جریان (CVT^3)، پایه‌های پل همگرا-عمودی در جهت جریان (CVS^4).

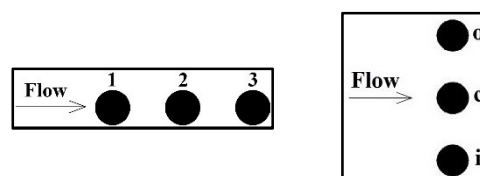
شکل 3 نیز نمایشگر نحوه قرارگیری پایه‌ها نسبت به امتداد جریان می‌باشد.



(ب) واگرا-عمودی (DV)

(الف) همگرا-عمودی (CV)

شکل 2 نحوه چیدمان گروه پایه‌ها



(ب) در امتداد جریان

(الف) عمود بر امتداد جریان

شکل 3 نحوه استقرار گروه پایه نسبت به امتداد جریان

¹ Divergent-Vertical Transverse

² Divergent-Vertical Streamwise

³ Convergent-Vertical Transverse

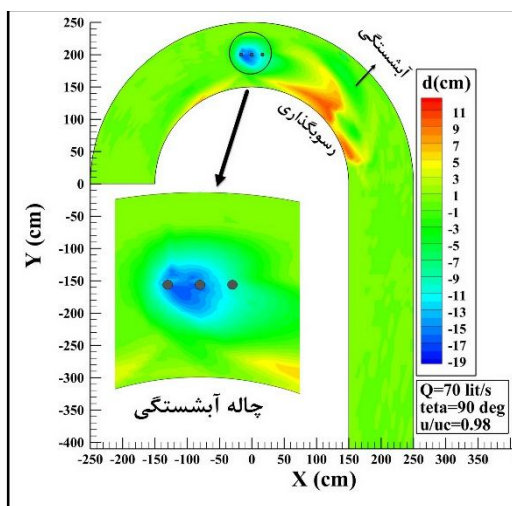
⁴ Convergent-Vertical Streamwise

علت این امر را می‌توان افزایش قدرت جریان پایین رونده در جلو پایه کج اول در گروه پایه CVS دانست. با استقرار گروه پایه‌ها در امتداد جریان، آبشستگی پیرامون پایه ردیف سوم نسبت به پایه‌های جلویی کمتر می‌باشد.

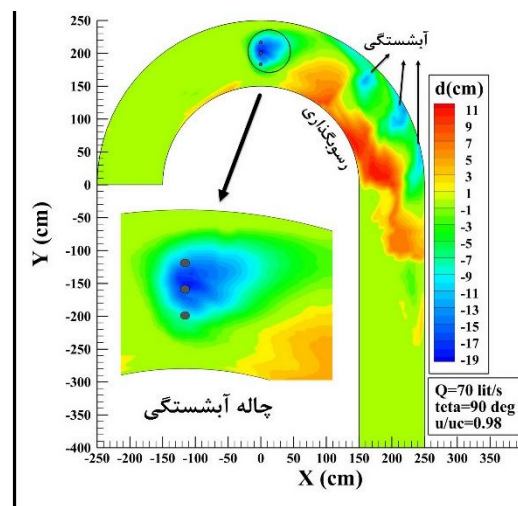
این مقدار در گروه پایه CVS و DVS به ترتیب معادل 260 و 237 درصد قطر پایه می‌باشد. در واقع پایه جلویی سبب کاهش سرعت جریان برخوردی به پایه عقبی می‌شود و همین امر مقدار آبشستگی حول پایه عقبی را کاهش می‌دهد. نحوه چیدمان پایه‌ها در گروه پایه DVS سبب کاهش آبشستگی نسبت به گروه پایه CVS شده است.

در شکل 5 توپوگرافی بستر در قوس 180 درجه با استقرار گروه پایه‌ها در رأس قوس آورده شده است.

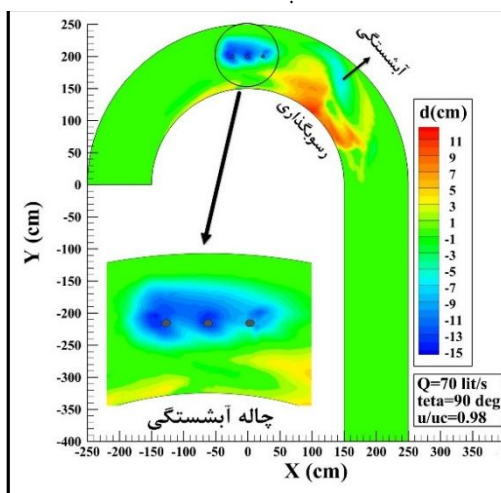
آزمایش حول پایه کج مجاور ساحل خارجی می‌باشد، در حالی که مقدار بیشینه عمق آبشستگی در گروه پایه DVT با گذشت 20 درصد از زمان تعادل نسبی در پایه کج مجاور ساحل داخلی می‌باشد. پس از آن بیشینه عمق آبشستگی حول پایه عمودی ایجاد شده و این روند تا پایان آزمایش ادامه دارد. با قرارگیری هر دو گروه پایه در جهت جریان، بیشترین میزان عمق آبشستگی تا انتهای آزمایش، در پایه کج اول ایجاد شده است. با توجه به شکل 4-ب و شکل 4-د، در هر دو گروه پایه CVS و DVS با گذشت زمان، اختلاف بیشینه عمق آبشستگی حول پایه عمودی و پایه اول کج ناچیز می‌گردد. همچنین بیشینه عمق آبشستگی حول پایه‌ها در گروه پایه CVS نسبت به گروه پایه DVS حدود 58 درصد قطر پایه بیشتر می‌باشد.



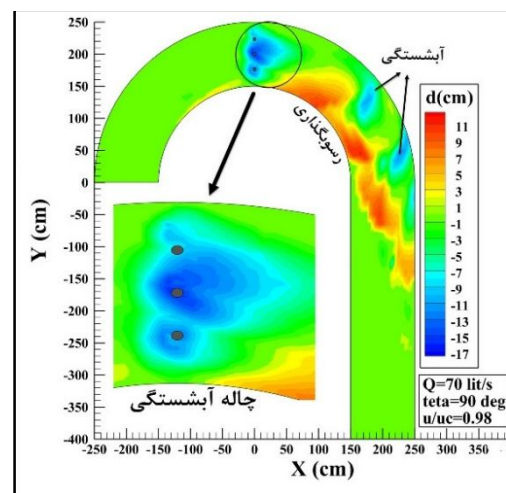
ب - CVS



الف - CVT



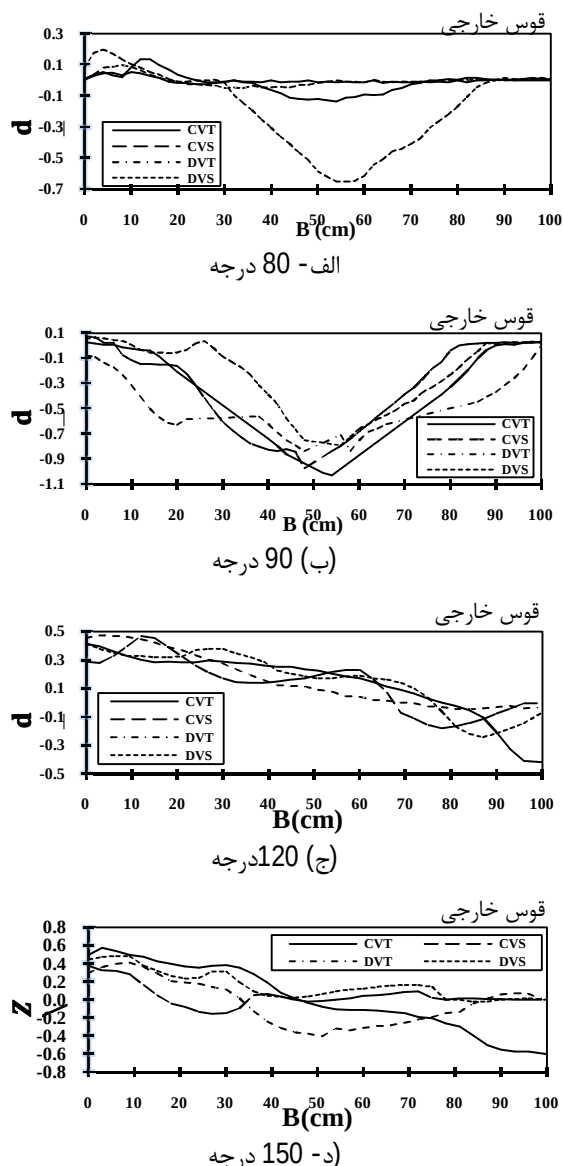
د - DVS



ج - DVT

شکل 5 توپوگرافی بستر گروه پایه‌های پل در موقعیت 90 درجه

توان نحوه چیدمان پایه‌ها، زاویه کج شدگی پایه‌ها و بیشتر بودن مقدار تنگ شدگی مقطع دانست.



شکل 6 پروفیل عرضی بستر در زوایای مختلف از قوس 180 درجه

البته می‌توان گفت در صورت انجام آزمایش با دیواره‌های غیر صلب فرسایش دیواره‌های ساحل خارجی نیز مشهود خواهد بود. در پایین دست پایه‌ها رسوبگذاری مجاور ساحل داخلی و فرسایش مجاور ساحل خارجی مشهود است (شکل 6-ج و شکل 6-د).

در شکل 7 نمونه‌ای از پروفیل‌های طولی بستر در فواصل

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیشترین مقدار آبشستگی پیرامون پایه‌ها ایجاد شده است. استقرار پایه‌ها در صفحه عمود بر جهت جریان سبب تغییرات گسترده بستر در پایین دست شده است. این تغییرات شامل رسوبگذاری مجاور ساحل داخلی و فرسایش مجاور ساحل خارجی است. پیشروی رسوبگذاری به گونه‌ای است که تا مسیر مستقیم پایین دست امتداد یافته و به سمت ساحل خارجی کشیده شده است. چاله‌های آبشستگی با عمق کمتری نسبت به چاله اصلی آبشستگی در نزدیکی ساحل خارجی شکل گرفته است. تعداد این چاله‌ها با استقرار پایه در صفحه عمود بر جهت جریان افزایش داشته است (شکل 5-الف و شکل 5-ج).

با قرارگیری پایه‌ها در جهت امتداد جریان، میزان پشته‌های رسوبی تشکیل شده، هم به لحاظ حجم و هم ارتفاع نسبت به قرارگیری در صفحه عمود بر جهت جریان کاهش یافته است. دلیل آن تنگ شدگی کمتر مقطع نسبت به حالت استقرار پایه‌ها در صفحه عمود بر مسیر جریان و در نتیجه خروج کمتر رسوبات از ناحیه استقرار پایه‌ها می‌باشد. بیشینه ارتفاع پشته‌های رسوبی مربوط به مدل DVT است و بیشینه عمق آبشستگی نیز ناشی از استقرار مدل پایه CVT در رأس قوس می‌باشد که می‌توان گفت هندسه پایه‌ها و اثر آن بر الگوی جریان پیرامون پایه‌ها عامل آن می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود چاله آبشستگی پیرامون پایه‌ها هیچ گونه تقارنی نسبت به محور طولی یا عرضی کانال ندارد.

شکل 6 نمونه‌ای از مقاطع عرضی در طول قوس را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 6-الف مشاهده می‌گردد که در دو گروه پایه CVT و DVT در مقطع 80 درجه چاله آبشستگی شکل گرفته است. در گروه پایه DVS چاله آبشستگی به سمت ساحل خارجی متمایل شده است. چاله آبشستگی CVS در مقایسه با گروه پایه‌های DVS در این موقعیت از گسترش کمتری برخوردار است. علت آن هندسه گروه پایه DVS می‌باشد که با نزدیک شدن به بستر فاصله بین پایه‌ها افزایش می‌یابد.

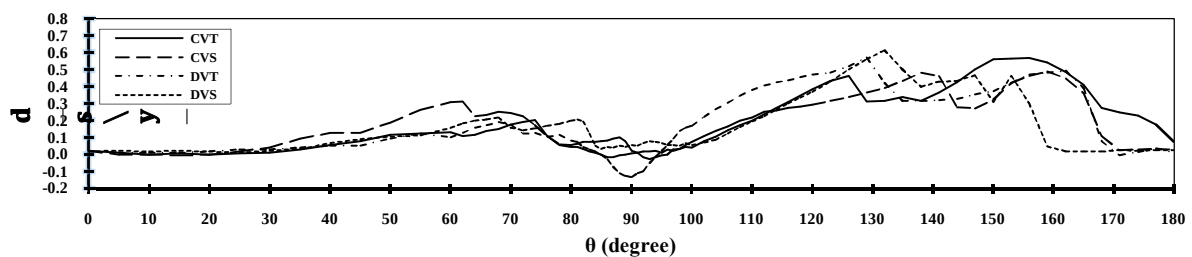
با توجه به شکل 6-ب چاله آبشستگی گروه پایه DVT به ساحل داخلی و خارجی رسیده است که علت آن را می‌-

4- نتیجه گیری

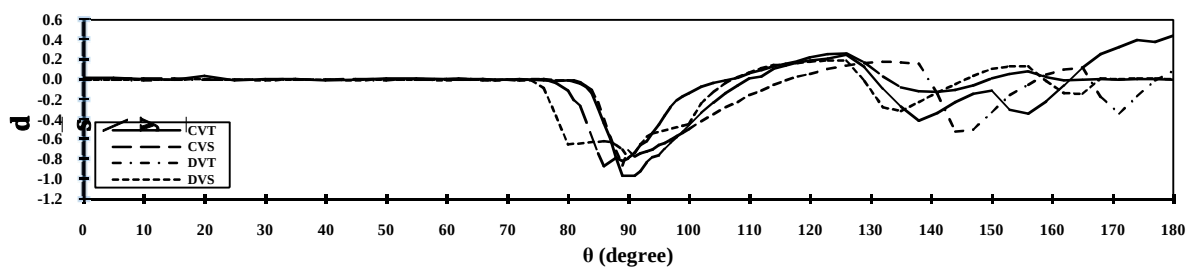
در این مقاله به بررسی آبشستگی حول گروه پایه سه تایی واگرا-عمودی، گروه پایه سه تایی همگرا-عمودی در موقعیت 90 درجه در قوس 180 درجه تند در جهت جریان و عمود بر صفحه جریان پرداخته شده است. مهم-ترین نتایج به شرح زیر است:

با استقرار در صفحه عمود بر جهت جریان بیشینه عمق آبشستگی در گروه پایه همگرا-عمودی از ابتدای آزمایش در پایهای که نزدیک به ساحل خارجی است، اندازه گیری شد. اما در گروه پایه واگرا-عمودی، تا 20 درصد زمان تعادل نسبی، بیشینه این پارامتر در پایه نزدیک به ساحل داخلی رخ داد و سپس در انتهای آزمایش محل بیشینه عمق آبشستگی به کنار پایه عمودی منتقل شد.

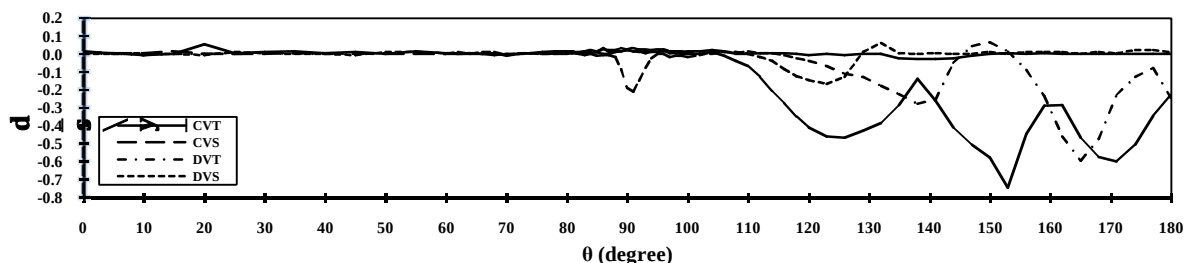
مختلف از ساحل داخلی آورده شده است. مقایسه شکل های 7- الف، ب و ج نشان می دهد در بالادست محل پایه ها، تغییرات بستر مجاور ساحل داخلی ایجاد شده است که علت آن تغییر در الگوی جریان در مسیر قوسی است. بررسی پروفیل های طولی نشان می دهد که در مجاورت ساحل داخلی پشته های متعدد و در مجاورت ساحل خارجی چاله های آبشستگی ایجاد شده است. در نواحی میانی عرض کانال، رسوبگذاری و آبشستگی متوالی مشاهده می شود (شکل 7- ب). با توجه به شکل 7- ج چاله های آبشستگی ایجاد شده در مجاورت ساحل خارجی با قرارگیری گروه پایه ها در صفحه عمود بر جهت جریان افزایش عمق داشته است. این افزایش عمق در استقرار گروه پایه CVT بطور محسوسی مشاهده می شود.



الف - 4 درصد عرض کانال



ب - 50 درصد عرض کانال



ج - 96 درصدی عرض کانال

شکل 7 پروفیل طولی بستر در فاصله های مختلف از ساحل داخلی

Emami, Y.; Salamatian, S.A.; and Ghodsian, M. (2008). "Scour at cylindrical bridge pier in a 180 degree channel bend". Proc. of the 4th International Con. on Scouring and Erosion., Tokyo, Japan.

Hannah, C. (1980). "Scour at pile groups". PhD Thesis, University of Canterbury. New Zealand.

Masjedi, A.R. Bejestan and M. Esfandi, A. (2010). "Experimental study on local scour around single oblong pier fitted with a collar in a 180 degree flume bend". Int. J. Sediment Res. 25(3), pp. 304-312.

Melville, B.W. (1975). "Local scour at bridge". Report No. 117, University of Auckland.

Nazariha, M. (1996). "Design relationship for maximum local scour depth for bridge pier groups". PhD Thesis, University of Ottawa, Canada.

Khajeh, S.B.M. Vaghefi, M. and Mahmoudi, A. (2017). "The scour pattern around an inclined cylindrical pier in a sharp 180-degree bend: an experimental study". Int. J. of River Basin Management. <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2016.1274322>. pp. 1-12.

Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). "Clear-water scour at cylindrical piers". J. of Hydraulic Eng. 109(3), pp. 338-350.

Vaghefi, M. Ghodsian, M. and Salimi, S. (2015). "Scour formation due to laterally inclined circular pier". Arabian J. for Science and Eng. 41(4), pp. 1311-1318.

Vaghefi, M. Ghodsian, M. and Salimi, S. (2016). "The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour". Sadhana. 41(1), pp. 75-86.

بیشینه عمق آبشستگی پایه کج نزدیک به ساحل خارجی در گروه پایه‌های همگرا-عمودی در حالت عمود بر جهت جریان 20 درصد از حالت گروه پایه واگرا-عمودی بیشتر می‌باشد. بیشینه عمق آبشستگی حول پایه‌ها در گروه پایه همگرا-عمودی در صفحه موازی جریان، نسبت به گروه پایه واگرا-عمودی در صفحه موازی جهت جریان حدود 58 درصد قطر پایه بیشتر می‌باشد. در هر دو مدل گروه پایه، بیشینه عمق آبشستگی در پایه اول کج و پایه عمودی در انتهای آزمایش یکسان شدند. عمق بیشینه آبشستگی ناشی از استقرار گروه پایه همگرا-عمودی در صفحه عمود بر جهت جریان می‌باشد.

5- منابع

Beg, M. and Beg, S. (2014). "Scour hole characteristics of two unequal size bridge piers in tandem arrangement". J. Hydraulic Eng. 21(1), pp. 85-96.

Bozkus, Z. and Cesme, M. (2010). "Reduction of scouring depth by using inclined piers". J. Civil Eng. 37(12), pp. 1621-1630.

Chiew, Y.M. (1992). "Scour protection at bridge piers". J. of Hydraulic Eng. 118(9), pp. 1260-1269.

Chiew, Y.M. and Melville, B.W. (1987). "Local scour around bridge piers". J. of Hydraulic Res. 25(1), pp. 15-26.

Dargahi, B. (1987). "Flow field and local scouring around a pier". No. 137, Royal Institute of Technology Hydraulics Laboratory, Stockholm, Sweden.