

تأثیر شرایط جریان بر ابعاد حفره آبستگي اطراف گروه پایه‌های پل ۶ تایی کج و عمود بر جهت جریان در کانال قوسی ۱۸۰ درجه

لیلا اقبال نیک^۱، محمد واقفی^{۲*}، محمدرضا گل‌بهار حقیقی^۳

۱- دانش آموزخته کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه خلیج فارس

۲- دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس

*vaghefi@pgu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱۰/۳]

چکیده

امروزه احداث پایه‌های کج در برخی پل‌ها در سراسر جهان به چشم می‌خورد. در حالی که مطالعات محدودی پیرامون آبستگي این گونه پایه‌ها انجام شده است. نظر به اهمیت صدمات جدی پدیده آبستگي، ساخت گروه پایه‌های عمودی-کج و مجهول بودن آثار آن به ویژه در مسیرهای دارای خم، این موضوع بررسی شد. در این پژوهش، اثر چیدمان متفاوت پایه پل عمودی و کج در گروه پایه‌های ۶ تایی، در کنار تأثیر شرایط جریان و موقعیت قرارگیری گروه پایه در قوس ۱۸۰ درجه تند در آزمایشگاه بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه عمق آبستگي و تراز رسوبگذاری در موقعیت ۶۰ درجه و شرایط بستر زنده رخ می‌دهد. این مقادیر به ترتیب معادل ۴/۲ و ۳/۲ برابر قطر پایه اندازه‌گیری شد. در هر سه موقعیت استقرار گروه پایه‌ها در قوس، بیشینه عمق آبستگي ناشی از قرارگیری گروه پایه همگرا-عمودی است. در حالی که بیشینه تراز رسوبگذاری در حالت استقرار گروه پایه واگرا-عمودی ایجاد شده است.

واژگان کلیدی: آبستگي، گروه پایه ۶ تایی، توپوگرافی بستر، قوس ۱۸۰ درجه تند، u/uc.

۱- مقدمه

فرسایش عمومی و موضعی از جمله عوامل ناپایداری و تغییر شکل رودخانه‌ها تلقی می‌شود. این پدیده در خم رودخانه‌ها نمود بیشتری دارد. این امر موجب جابه‌جایی عرضی و تغییر مسیر رودخانه می‌شود. در وقوع فرسایش‌های

عمومی و موضعی عوامل طبیعی و انسانی دخالت دارند. از جمله عوامل انسانی می‌توان به احداث پل‌ها اشاره نمود [1]. شکل (۱) نمونه‌ای از پل احداث شده روی قوس رودخانه را نشان می‌دهد. در گزارش پارکر^۱ (۱۹۹۸)، از بررسی آبستگي

1 Parker

پژوهش‌ها می‌توان از تحقیق چابرت و انگلدینگر^۱ (۱۹۵۶)، شن و همکاران^۲ (۱۹۶۶)، چپو و ملویل^۳ (۱۹۸۷)، ملویل و ساترلند^۴ (۱۹۸۸)، دی و همکاران^۵ (۱۹۹۵)، ملویل و چپو (۱۹۹۹)، الیوتو و هگر^۶ (۲۰۰۲)، شپارد و همکاران^۷ (۲۰۰۶)، فائل و همکاران^۸ (۲۰۱۶) نام برد [4-12]. اما به دلیل طبیعت پیچیده جریان در مسیرهای دارای خم، آبستگي پایه پل در آن کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از مطالعات صورت گرفته در این زمینه، پژوهش مسجدي و همکاران^۹ (۲۰۱۰) است. ایشان آبستگي حول پایه عمودی منفرد را در قوس ۱۸۰ درجه ملایم بررسی نموده‌اند [13]. واقفی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۸) آبستگي گروه پایه سه‌تایی عمودی را در قوس ۱۸۰ درجه تند مورد آزمایش قرار دادند. اثر موقعیت و چگونگی استقرار پایه در جهت جریان از پارامترهای مورد بررسی ایشان بوده است [14].

امروزه احداث پایه‌های کج در پل‌های بسیاری در سراسر جهان به چشم می‌خورد. این در حالی است که مطالعات محدودی پیرامون آبستگي این گونه پایه‌ها انجام شده است. از اولین مطالعات صورت گرفته حول پایه کج می‌توان به آزمایش‌های بزکوس و یلدیز^{۱۱} (۲۰۰۴) اشاره نمود. ایشان اثر کج شدگی پایه به سمت پایین دست را بررسی کردند. آزمایش‌ها برای پایه استوانه‌ای شکل و در فلوم مستقیم بوده است [15]. بزکوس و سسمه^{۱۲} (۲۰۱۰)، آبستگي پیرامون گروه پایه کج دوتایی را مورد آزمایش قرار دادند. آزمایش‌های ایشان نیز در مسیر مستقیم انجام شده است [16].

پل‌های کشور آمریکا، ۲۲۴۹۵ پل مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که ۳۳ درصد آن‌ها با آبستگي مواجه شده‌اند. در این میان، ۵۶ درصد از آن‌ها به علت وجود جریان با زاویه برخورد، یا آبراهه دارای خم و یا تلفیق این دو مورد حادث شده‌اند [2].

شکل ۱. پل ریوگرانده، مکزیک



Fig. 1. Rio Grande Bridge, Mexico

همچنین ۱۸ درصد از آبستگي‌ها در اثر وجود دیواره‌های زاویه‌دار آبراهه بوجود آمده‌اند. ۲۶ درصد باقیمانده نیز در اثر فرسایش پایه و کوله پل در مسیر مستقیم مشاهده شده است [2]. شکل (۲) نمایشگر ریزش پل بر اثر آبستگي موضعی حول پایه‌ها است.

شکل ۲. تخریب پل بر اثر آبستگي (پل کن)



Fig. 2. Bridge Failures due to Scour (Kan Bridge)

سازوکار آبستگي حول پایه استوانه‌ای، تحت اثر پیوستن جریان‌های سه بعدی پیچیده در بالادست پایه و گردابه‌های متوالی در منطقه پایین دست آن است [3]. این جریان‌های سه بعدی با قرار گیری در خم رودخانه پیچیده‌تر می‌شوند. پژوهش‌های جامعی حول آبستگي موضعی پایه عمودی منفرد در مسیر مستقیم انجام شده است. از جمله این

1 Chabret and Engeldinger

2 Shen et al

3 Cheiw and Melville

4 Melville and Sutherland

5 Dey et al

6 Oliveto and Hager

7 Sheppard et al

8 Fael et al

9 Masjedi et al

10 Vaghefi et al

11 Bozkus and Yildiz

12 Bozkus and Cesme

جدول ۱. مشخصات فلوم آزمایشگاهی

Floor and Frame	Walls	Gate	Underground Storage Tank	Longof Downstream Straight	Long of Upstream Straight	Channel Width
Steel	Glass	Butterfly Gate	20000 m ³	5 m	6.5 m	1 m

Table. 1. Properties of the Laboratory Flume

درجه و سیستم چرخشی جریان آب را داراست. شعاع مرکزی قوس ۲ متر بوده و آن را در دسته قوس‌های تند قرار می‌دهد [21]. مشخصات فلوم مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است. نمایی از فلوم آزمایشگاه در شکل (۳) مشاهده می‌شود. در کلیه آزمایش‌ها دبی ثابت ۷۰ لیتر بر ثانیه با استفاده از دستگاه آلتراسونیک دبی سنج تنظیم شده و توسط پمپ سانتریفیوژ وارد مخزن ورودی شد. آرام کننده جریان درون مخزن و مسیر مستقیم بالادست برای اطمینان از یکنواختی جریان قبل از رسیدن به پایه تعبیه شده‌اند. گروه پایه‌های کج عمودی بررسی شده در این پژوهش دارای شش پایه استوانه-ای شکل به قطر ۵ سانتی‌متر هستند. در انتخاب مقیاس سعی شد که ابعاد نهایی پایه به گونه‌ای باشد که دیواره‌ها روی آبشستگی تأثیری نداشته باشند. طبق نظر رادکیوی و اتما^۲ (۱۹۸۳) چنانچه نسبت عرض فلوم به قطر پایه از ۶/۲۵ بیشتر باشد دیواره‌های فلوم تأثیری بر مقدار آبشستگی نخواهند داشت [22]. زاویه کج شدگی نیز با توجه به بررسی‌های واقفی و همکاران (۲۰۱۶)، ۲۱ درجه در نظر گرفته شد [19].

شکل ۳. نمایی از فلوم آزمایشگاهی



Fig. 3. A View of the Laboratory Flume

اقبال‌نیک و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه آبشستگی حول گروه پایه سه تایی واگرا-عمودی، گروه پایه سه تایی همگرا-عمودی در موقعیت ۹۰ درجه در امتداد جریان و در صفحه عمود بر جهت جریان پرداخته‌اند. بدین منظور آزمایش‌هایی در کانال با قوس ۱۸۰ درجه تند، در شرایط استانه حرکت انجام گرفت. پایه‌های استفاده شده استوانه‌ای و زاویه کج شدگی ۲۱ درجه بوده است [17]. واقفی و همکاران (۲۰۱۶) نیز به بررسی تأثیر کج شدگی تک پایه دایره‌ای شکل در صفحه عمود بر جریان، بر ماکزیمم عمق، شکل و سایر پارامترهای حفره‌های آبشستگی پرداختند [18]. همچنین واقفی و همکاران (۲۰۱۶) آبشستگی پیرامون پایه استوانه‌ای کج با دو قطر و زاویه کج شدگی مختلف پایه را در مسیر مستقیم بررسی نمودند. [19]. اثر کج شدگی پایه بر آبشستگی در مسیر قوسی توسط بن محمد خواجه و همکاران^۱ (۲۰۱۷) بررسی شده است. ایشان جهت کج شدگی پایه را به سمت بالا دست، پایین دست، ساحل داخلی و خارجی در نظر گرفتند [20].

در سال‌های اخیر، گروه پایه‌های پل با چیدمان متفاوتی از پایه‌های عمودی و کج طراحی و ساخته شده‌اند. اگر چه آبشستگی ناشی از استقرار آن‌ها کمتر مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است. بنابراین با توجه به صدمات مالی و جانی ناشی از آبشستگی لازم دیده شد که اثر چیدمان-های مختلف پایه‌های کج و عمودی بررسی شود.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه خلیج فارس بوشهر انجام شده است. این آزمایشگاه فلومی با قوس ۱۸۰

زنده نیز انجام می‌شود. جریان زلال شرایطی است که در آن پدیده آبستگي در بالادست ناحیه مورد مطالعه رخ نمی‌دهد و همچنین جریان ورودی به محدوده بررسی شده حاوی رسوب نیستند. در شرایط بستر زنده، جریان ورودی در حال حمل رسوب است. حفره آبستگي به وسیله رسوب بالادست تغذیه می‌شود. در این میزان آبستگي حول مقدار تعادلی در حال نوسان است.

پدیده آبستگي در اطراف پایه‌های پل فرآیندی زمان‌بر بوده و تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چپو (۱۹۸۴) در طی پژوهشی در این باره اظهار کرد اگر بعد از گذشت ۸ ساعت مقدار تغییرات عمق آبستگي کمتر از ۱ میلی‌متر باشد آزمایش به تعادل رسیده است [23]. بنابراین بدین منظور آزمایش آبستگي با حضور پایه منفرد عمودی در رأس قوس در شرایط آستانه حرکت انجام پذیرفت. پس از گذشت زمان ۴۴ ساعت معیار چپو (۱۹۸۴) حاصل شد. در این زمان آبستگي معادل ۹۷ درصد عمق جریان در ابتدای قوس رخ می‌دهد. این زمان طولانی بوده، پس زمانی که در آن ۹۳ درصد عمق آبستگي روی می‌دهد، مبنای زمانی در نظر گرفته شد. این زمان که زمان تعادل نسبی گفته می‌شود معادل ۱۲ ساعت است (شکل ۵).

در مجموع به منظور بررسی تأثیر شرایط جریان (نسبت u/uc)، موقعیت قرارگیری گروه پایه‌ها در قوس ۱۸۰ درجه تند و چگونگی چیدمان و ترکیب پایه کج-عمودی بر تغییرات بستر ناشی از آن در پایین دست، ۱۸ آزمایش انجام شد که دامنه پارامترهای مورد بررسی در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل ۴. نمای پلان گروه پایه‌ها، (الف) گروه پایه واگرا-عمودی (D-V)، (ب) گروه پایه همگرا-عمودی (C-V)

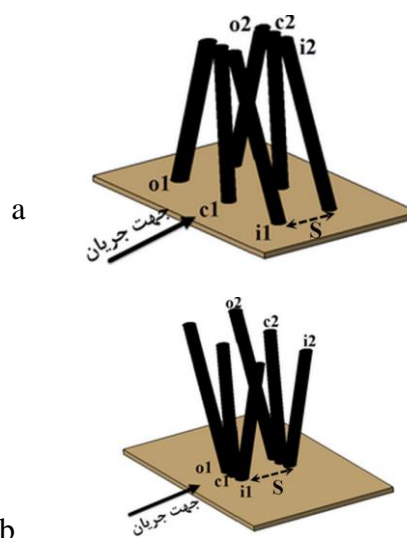


Fig. 4. A Plan View of the Pier Group, Divergent- Vertical pier group (D-V), Convergent- Vertical (C-V) pier group

همچنین فاصله دو ردیف پایه‌ها برابر $S/D_p = 3.4$ انتخاب شد (D_p قطر پایه‌ها و S فاصله دو ردیف پایه‌ها است). چگونگی چیدمان و نامگذاری گروه پایه‌ها و هریک از پایه‌ها در شکل (۴) آورده شده است.

برای حذف اثر اندازه رسوب بر عمق آبستگي موضعی طبق تحقیق ملویل و ساترلند (۱۹۸۸) نسبت قطر پایه به قطر ذرات رسوبی باید از ۲۰-۲۵ بیشتر باشد [7]. رسوبات استفاده شده در این پژوهش دارای قطر متوسط $1/14$ میلی‌متر بود. ضخامت مواد بستر با توجه به بیشینه عمق آبستگي محتمل ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شد. حادترین شرایط آبستگي موضعی در مجاورت پایه پل زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات رسوب بستر واقع در بالادست پایه در آستانه حرکت قرار بگیرند. آبستگي موضعی در دو حالت شرایط جریان زلال و بستر

شکل ۵. منحنی توسعه زمانی عمق آبستگي در آزمایش زمان تعادل

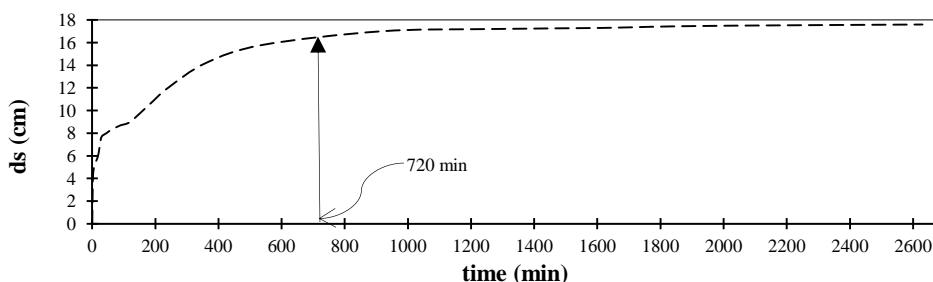


Fig. 5. Scour Depth Duration Curve in Equilibrium Time Test

جدول ۲. مشخصات کلیه آزمایش‌ها

Froude number	Depth of flow	(u/uc)	Piers positions (degree)	Abbreviation for tests	Test number
0.31	17.2	1.03	60	(C-V)L60	1
0.29	18	0.98	60	(C-V)I60	2
0.25	20	0.87	60	(C-V)C60	3
0.31	17.2	1.03	60	(D-V)L60	4
0.29	18	0.98	60	(D-V)I60	5
0.25	20	0.87	60	(D-V)C60	6
0.31	17.2	1.03	90	(C-V)L90	7
0.29	18	0.98	90	(C-V)I90	8
0.25	20	0.87	90	(C-V)C90	9
0.31	17.2	1.03	90	(D-V)L90	10
0.29	18	0.98	90	(D-V)I90	11
0.25	20	0.87	90	(D-V)C90	12
0.31	17.2	1.03	120	(C-V)L120	13
0.29	18	0.98	120	(C-V)I120	14
0.25	20	0.87	120	(C-V)C120	15
0.31	17.2	1.03	120	(D-V)L120	16
0.29	18	0.98	120	(D-V)I120	17
0.25	20	0.87	120	(D-V)C120	18

Table 2. Properties of Experiments

حفره‌ها به تدریج در عرض کانال به سمت ساحل خارجی جابه‌جا می‌شود. همچنین در شرایط بستر زنده تعداد این چاله‌ها افزایش می‌یابد. بزرگ‌نمایی چاله آبشستگی حول گروه پایه‌ها در شکل (۶) آورده شده است. شکل‌های مذکور نشان می‌دهند که در اثر افزایش u/uc ابعاد حفره آبشستگی تغییر می‌نماید. حفره آبشستگی پیرامون پایه‌ها در هر دو مدل گروه پایه در موقعیت ۶۰ درجه، به سمت ساحل داخلی منحرف شده است. این انحراف در گروه پایه (D-V) با افزایش نسبت u/uc کاهش یافته و در گروه پایه (C-V) افزایش می‌یابد. تأثیر جهت کج شدگی پایه‌ها که در گروه پایه (C-V) به سمت سواحل قوس و در گروه پایه (D-V) به سمت مرکز کانال است از دلایل اختلاف در این پارامتر است. مسیر سرعت‌های ماکزیمم در قوس ۱۸۰ درجه نشان می‌دهد که بیشینه سرعت در نیمه اول قوس مجاور ساحل داخلی و در نیمه دوم در مجاورت ساحل خارجی قرار می‌گیرد.

۳- بحث و نتایج

شکل (۶) توپوگرافی بستر با استقرار گروه پایه‌های کج-عمودی (C-V) و (D-V) در شرایط مختلف جریان در موقعیت ۶۰ درجه از ابتدای قوس را نشان می‌دهد. میزان پیشروی تغییرات ایجاد شده در پایین دست محل استقرار پایه‌ها مشهود است. به گونه‌ای که تغییرات بستر با استقرار پایه‌های (C-V) در شرایط جریان زلال و آستانه حرکت به ترتیب تا ۵۹ و ۸۴ برابر قطر پایه در پایین دست امتداد یافته است. این پارامتر به ازای گروه پایه (D-V) در شرایط جریان زلال و آستانه حرکت به ترتیب معادل ۶۳ و ۹۴ برابر قطر پایه بدست آمد.

در شرایط بستر زنده، مصالح سریع‌تر توسط جریان جابه‌جا شده و تغییرات بستر تا انتهای مسیر مستقیم پایین دست امتداد دارد. از دیگر نکات قابل ذکر جابه‌جایی حفره‌های آبشستگی ایجاد شده بعد از محل استقرار پایه‌ها با تغییر رژیم جریان است. با افزایش مقدار u/uc این

شکل ۶. توپوگرافی بستر با گروه پایه در موقعیت ۶۰ درجه در شرایط رژیم جریان مختلف الف) گروه پایه (C-V)، ب) گروه پایه (D-V)

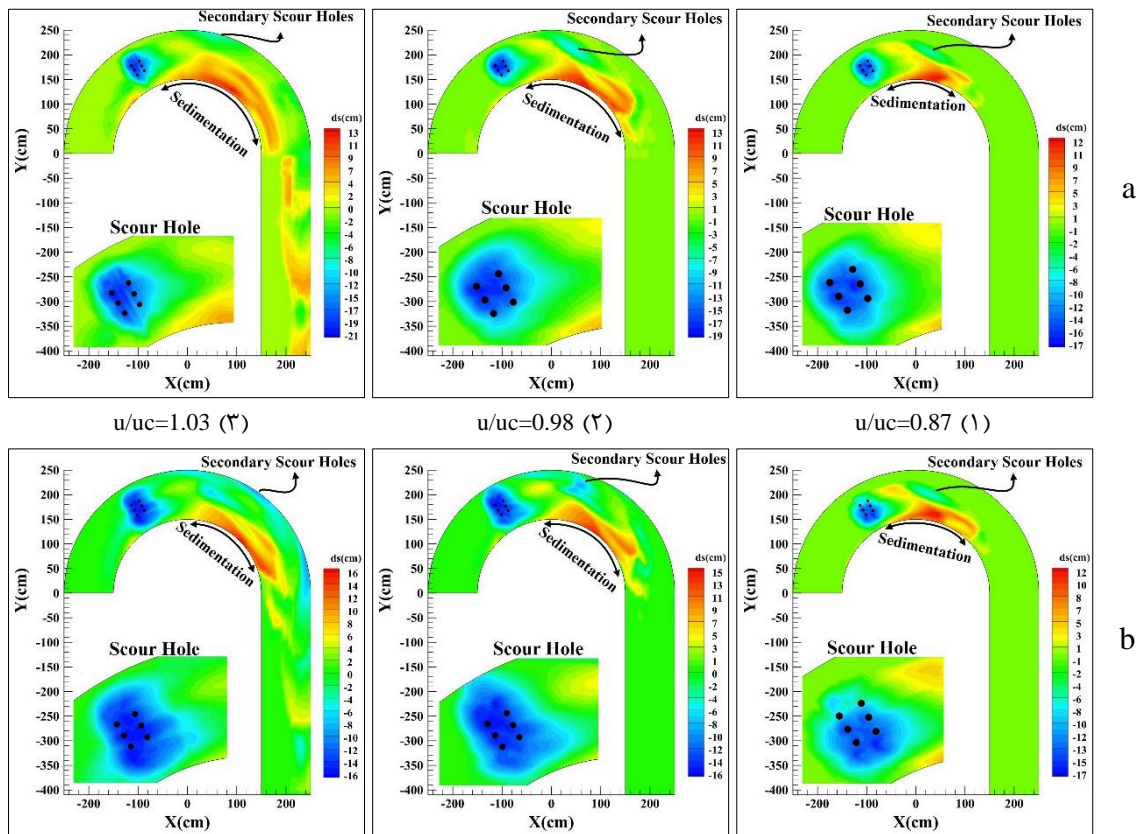


Fig. 6. Bed topography with pier group in the 60 degree position under different flow regime conditions of a) (C-V) pier group, and b) (D-V) pier group

آمده است. افزایش تغییرات بستر در همه جهات با تغییر رژیم جریان و افزایش مقدار u/uc به وضوح مشاهده می‌شود. از جمله این تغییرات می‌توان به میزان پیشروی تغییرات عمومی بستر در طول کانال اشاره نمود. به طوری که در گروه پایه (C-V) در حالت جریان زلال و آستانه حرکت، تغییرات بستر تا ۵۶ و ۱۳۲ برابر قطر پایه از محل استقرار گروه پایه رسیده است. در گروه پایه (D-V) این فاصله تا محل پایه‌ها به ترتیب ۵۴ و ۱۲۵ برابر قطر پایه است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود میزان پیشروی تغییرات بستر در پایین دست با استقرار گروه پایه (C-V) افزایش می‌یابد. البته این اختلاف در میزان پیشروی تغییرات بستر در پایین دست دو گروه پایه، با افزایش u/uc افزایش می‌یابد. به طوری که در شرایط جریان زلال و آستانه حرکت به ترتیب افزایشی معادل ۲ و ۷ برابر قطر پایه دارد. در شرایط بستر زنده با استقرار هر دو گروه پایه در زمانی معادل ۴۲ درصد زمان تعادل نسبی، تغییرات عمومی بستر به انتهای مسیر مستقیم کانال رسید. بیشتر بودن سرعت

همین امر از دیگر علل انحراف حفره آبستگي پایه‌های مستقر در موقعیت ۶۰ درجه به سمت ساحل داخلی شده است. در این موقعیت در شرایط مختلف جریان، ماکزیمم عمق آبستگي متعلق به آزمایش‌های گروه پایه (C-V) است. اختلاف ماکزیمم عمق آبستگي گروه پایه (D-V) نسبت به گروه پایه (C-V) در شرایط جریان زلال، آستانه حرکت و بستر زنده به ترتیب معادل ۳، ۱۲ و ۲۵ درصد عمق جریان در ابتدای قوس است. مشاهده می‌شود که افزایش مقدار u/uc در این موقعیت سبب افزایش اختلاف ماکزیمم عمق آبستگي دو گروه پایه می‌شود. محل ایجاد ماکزیمم عمق آبستگي در این موقعیت، حول پایه‌های ردیف اول یا در فاصله بین دو ردیف پایه‌ها و مجاور پایه نزدیک ساحل خارجی ایجاد شده است. که این موضوع اثر محافظت کردن پایه‌های ردیف دوم توسط پایه‌های ردیف اول را نشان می‌دهد.

توپوگرافی بستر با استقرار پایه‌های (C-V) و (D-V) در رژیم‌های متفاوت جریان در موقعیت ۹۰ درجه در شکل (۷)

پایه‌های (C-V) حفره آبستگي به ساحل خارجی نرسیده است. درحالی که با استقرار پایه‌های (D-V) این حفره تا ساحل خارجی امتداد می‌یابد. چیدمان پایه‌ها و جهت کج شدگی پایه‌های (D-V) به سمت مرکز کانال علت این امر است به طوری که با افزایش فرسایش حول پایه‌ها فاصله بین پایه‌های عمود و کج مجاور افزایش می‌یابد.

همان‌گونه که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود در همه آزمایش‌ها، مجاور ساحل داخلی رسوبگذاری ایجاد شده است. با افزایش u/uc طول این پشته‌های مجاور ساحل داخلی افزایش می‌یابد. در هر دو گروه پایه (C-V) و (D-V) این روند مشاهده می‌شود. ماکزیمم ارتفاع رسوبگذاری با قرارگیری پایه‌های (C-V) رابطه مستقیم با افزایش مقدار u/uc دارد. در حالی که با استقرار پایه‌های (D-V) این مقدار با افزایش u/uc کاهش می‌یابد.

متوسط نسبت به سرعت بحرانی و تنگ شدگی مقطع با وجود پایه‌ها عامل این افزایش تغییرات است.

با توجه به تصاویر بزرگنمایی شده در شکل (۷) ملاحظه می‌شود جهت انحراف حفره‌های پیرامون پایه‌ها به سمت ساحل خارجی است. مقدار انحراف چاله به سمت ساحل خارجی با افزایش مقدار u/uc افزایش می‌یابد. مقدار انحراف حفره در گروه پایه (C-V) با تغییر رژیم جریان به آستانه حرکت و بستر زنده، افزایشی معادل ۲ و ۳ برابر قطر پایه دارد. در گروه پایه (D-V) این انحراف با رسیدن به آستانه حرکت ۳ برابر قطر پایه افزایش می‌یابد. در شرایط بستر زنده چاله حول پایه‌ها به چاله‌های حفر شده در پایین دست پایه‌ها می‌رسد. با توجه به آشفتگی جریان در این شرایط و کاهش عرض مقطع، انتقال رسوبات و فرسایش ایجاد شده سبب شکل‌گیری این تغییرات در پایین دست پایه‌ها می‌شود. در

شکل ۷. توپوگرافی بستر با گروه پایه در موقعیت ۹۰ درجه در شرایط رژیم جریان مختلف الف) گروه پایه (C-V)، ب) گروه پایه (D-V)

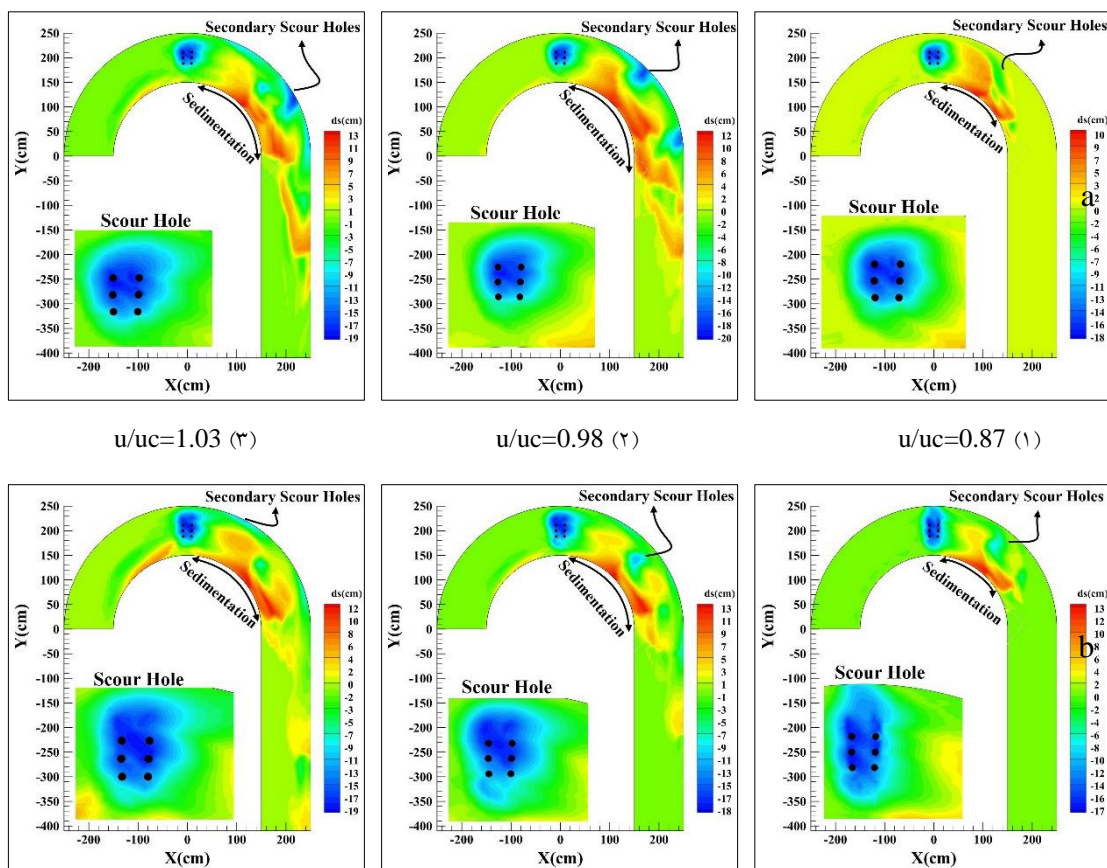


Fig. 7. Bed topography with pier group in the 90 degree position under different flow regime conditions of a) (C-V) pier group, and b) (D-V) pier group

شکل ۸. توپوگرافی بستر با گروه پایه در موقعیت ۱۲۰ درجه در شرایط رژیم جریان مختلف الف) گروه پایه (C-V)، ب) گروه پایه (D-V)

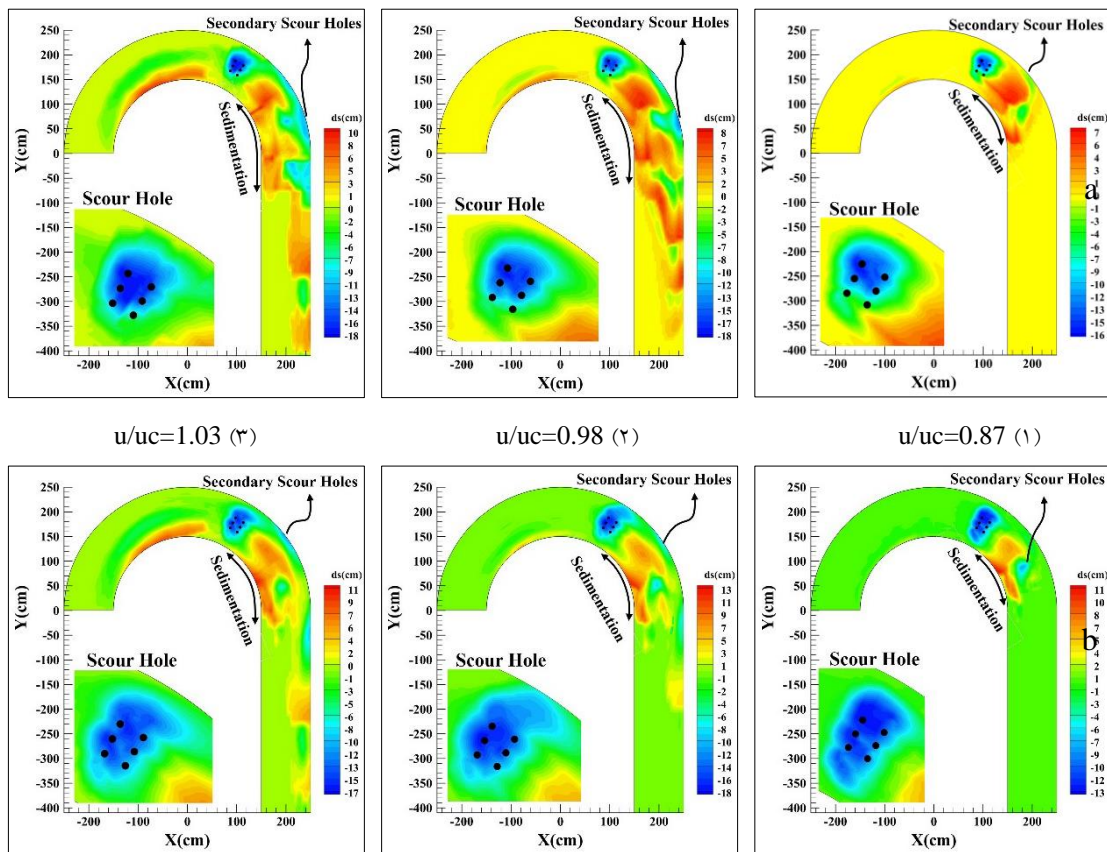


Fig. 8. Bed topography with pier group in the 120 degree position under different flow regime conditions of a) (C-V) pier group, and b) (D-V) pier group

(C-V) عمق آبستگي افزایش می‌یابد. تغییر رژیم جریان از آستانه حرکت به بستر زنده در گروه پایه (D-V) سبب افزایش عمق ماکزیمم آبستگي و در گروه پایه (C-V) سبب کاهش آن می‌شود. در اینجا نیز مانند موقعیت ۶۰ درجه، محل تشکیل عمق ماکزیمم آبستگي کنار پایه مجاور ساحل خارجی و ردیف اول است. افزایش u/uc سبب پیشروی حفره آبستگي حول پایه‌ها به بالادست محل استقرار پایه‌ها می‌شود. توپوگرافی بستر به همراه بزرگنمایی حفره آبستگي حول آن در رژیم‌های مختلف جریان به ازای استقرار پایه‌ها در موقعیت ۱۲۰ درجه در شکل (۸) آورده شده است. افزایش تغییرات عمومی بستر با افزایش نسبت u/uc ، با مقایسه شکل-های (۸-الف و شکل‌های ۸-ب) به وضوح مشاهده می‌شود. منظور از این تغییرات عمومی، تغییر در طول و تراز رسوبگذاری‌ها و همچنین تغییر در حفره‌های ایجاد شده در پایین دست پایه‌ها است. این تغییرات بسیار حائز اهمیت است. چرا که فرسایش بیشتر ساحل خارجی نسبت به

در گروه پایه (C-V) در $u/uc = 0.87, 0.98, 1.03$ ماکزیمم تراز رسوبگذاری به ترتیب ۵۱، ۶۷ و ۷۶ درصد عمق جریان در ابتدای قوس است که به ترتیب در فاصله‌های معادل ۲۴، ۳۱ و ۳۲ برابر قطر پایه از محل پایه‌ها ایجاد شده‌اند. ارتفاع ماکزیمم رسوبگذاری در گروه پایه (D-V) در $u/uc = 0.87, 0.98, 1.03$ به ترتیب معادل ۶۶، ۷۲ و ۶۹ درصد عمق جریان در ابتدای قوس و در فاصله ۲۹، ۳۴ و ۵۰ برابر قطر پایه از موقعیت پایه‌ها شکل گرفته است. مشاهده می‌شود که افزایش u/uc سبب پیشروی بیشتر ماکزیمم رسوبگذاری به پایین دست شده و سبب افزایش فاصله محل شکل‌گیری آن با پایه‌ها می‌شود. این فاصله در رژیم‌های مختلف جریان با استقرار گروه پایه (D-V) نسبت به (C-V) افزایش می‌یابد. ماکزیمم عمق آبستگي در این موقعیت در رژیم‌های جریان مختلف در گروه پایه (C-V) نسبت به گروه پایه (D-V) بیشتر است. با تغییر رژیم جریان از جریان زلال به آستانه حرکت در آزمایش‌های مربوط به هر دو گروه پایه (D-V) و

به ساحل خارجی منحرف می‌شود. در شکل (۹) نمونه‌ای از تصویر واقعی تغییرات بستر آورده شده است. این تصویر مربوط به آزمایش (D-V)I120 است. رسوبگذاری مجاور ساحل داخلی و فرسایش مجاور ساحل خارجی مشخص است. با امتداد تغییرات بستر در مسیر مستقیم پایین دست تشکیل رسوبگذاری و حفره‌های متوالی در مجاور دیواره خارجی مشاهده می‌شود.

شکل ۹. نمونه‌ای از بستر در مسیر مستقیم پایین دست گروه پایه‌ها، آزمایش (D-V)I120



Fig. 9. An instance of bed at the downstream straight end, (D-V)I120 experiment

ماکزیمم عمق آبستگي در همه آزمایش‌ها حول پایه‌ها ایجاد شده است. شکل (۱۰) نمودار ماکزیمم عمق آبستگي را به ازای موقعیت ایجاد آن نسبت به محور طولی کانال نشان می‌دهد. در این نمودار dsm معرف ماکزیمم عمق آبستگي، Dp قطر پایه است.

ماکزیمم عمق آبستگي مربوط به آزمایش (C-V)L60 بوده که معادل $4/2$ برابر قطر پایه اندازه‌گیری شده است. کمترین عمق آبستگي نیز معادل $2/7$ برابر قطر پایه در آزمایش (D-V)C120 است. اگرچه انتظار می‌رود افزایش u/uc تا حد آستانه حرکت سبب افزایش قابل توجه عمق آبستگي شود، اما با استقرار گروه پایه (D-V) در موقعیت 60 درجه با افزایش u/uc ، این مقدار تقریباً برابر است. در موقعیت 90 و 120 درجه، هر دو گروه پایه (C-V) و (D-V) با تغییر شرایط جریان از آستانه حرکت به بستر زنده با کاهش ماکزیمم عمق آبستگي مواجه می‌شوند. دلیل این امر این است که در شرایط بستر زنده حرکت رسوبات از بالادست به

رسوبگذاری ساحل داخلی سبب عریض شدن رودخانه و رسوبگذاری بیشتر ساحل داخلی نسبت به فرسایش ساحل خارجی، تنگ شدگی مقطع را در پی دارد. این عامل سبب تغییر در جریانات ایجاد شده در پایین دست پایه‌ها می‌شود و ممکن است سبب مهاجرت جانبی رودخانه پیچانی شود. در ترتیب در فاصله‌ای معادل 44 ، 115 و 124 برابر قطر پایه از پایه‌ها رسیده است. در پایه‌های (D-V) این فاصله به ترتیب 46 ، 104 و 124 برابر قطر پایه است. با افزایش u/uc تغییرات بستر در هر دو مدل گروه پایه در پایین دست امتداد بیشتری یافته است. البته الگوی منظمی با مقایسه دو گروه پایه (C-V) و (D-V) مشاهده نمی‌شود. با مقایسه شکل‌های مربوط به دو گروه پایه مشخص است که ماکزیمم رسوبگذاری پایه‌های (D-V) نسبت به پایه‌های (C-V) بیشتر است. ماکزیمم تراز رسوبگذاری پایه‌های (C-V) با افزایش u/uc روند افزایشی داشته است. ولی در مدل پایه‌های (D-V) با تغییر رژیم جریان از آستانه حرکت به بستر زنده با کاهش مواجه می‌شود. همچنین اینکه محل شکل‌گیری آن با استقرار گروه پایه (D-V) نسبت به گروه پایه (C-V) در فاصله بیشتری از محل پایه‌ها در پایین دست واقع شده است. به طور متوسط ماکزیمم ارتفاع رسوبگذاری در پایه‌های (D-V) در هر سه u/uc حدود 6 برابر قطر پایه در فاصله دورتری از محل پایه‌ها نسبت به مدل پایه‌های (C-V) واقع شده است. با تغییر شرایط جریان از آب زلال به آستانه حرکت مقدار این پارامتر افزایش و با تغییر از آستانه حرکت به بستر زنده کاهش یافته است.

روند مذکور در هر دو گروه پایه مشاهده شده است. انحراف حفره‌های آبستگي حول پایه‌ها با افزایش مقدار u/uc افزایش می‌یابد به طوری که در شرایط بستر زنده در هر دو مدل پایه‌ها، چاله آبستگي به چاله‌های پایین دست محل پایه‌ها وصل شده است. فاصله چاله‌های آبستگي پیرامون پایه‌ها از ساحل داخلی نسبت به ساحل خارجی بیشتر است. این موضوع نیز انحراف حفره را به سمت ساحل خارجی نشان می‌دهد. با برخورد جریان به پایه‌ها و افزایش سرعت جریان در این مقطع به علت تنگ شدگی مقطع، جریان بیشتر

که ماکزیمم سرعت در ترازهای مختلف در نیمه دوم قوس در مجاورت ساحل خارجی قرار می‌گیرد. همین امر باعث ایجاد آبستگي در این ناحیه شده است. این روند در آزمایش‌های هر دو گروه پایه مشاهده شده است.

شکل ۱۱. ماکزیمم عمق بی بعد شده حفره دوم آبستگي نسبت به موقعیت شکل‌گیری آن

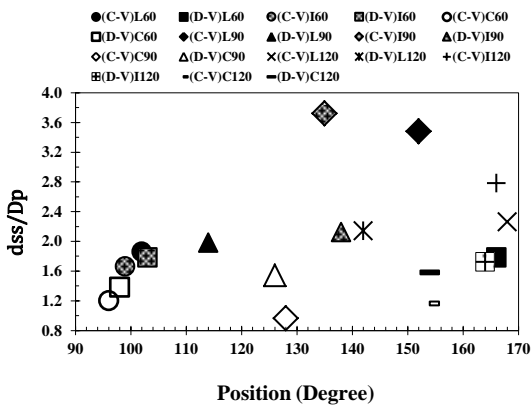


Fig. 11. The relative maximum depth of the second scour hole nondimensionalized against the position of its occurrence

نمونه‌ای از چاله دوم آبستگي در شکل (۱۲) آورده شده است. در شکل مذکور تراز اولیه بستر با خط قرمز مشخص شده است. همان‌گونه که در گذشته ذکر شده چاله دوم آبستگي در پایین دست پایه و مجاورت ساحل خارجی تشکیل می‌شود. همچنین از عمق قابل توجهی نیز برخوردار است.

شکل ۱۲. نمونه‌ای از چاله دوم آبستگي، آزمایش (D-V)I120



Fig. 12. An instance of the second scour hole, (D-V) I120 experiment

در شکل (۱۳) ماکزیمم تراز رسوبگذاری و موقعیت شکل‌گیری آن در همه آزمایش‌ها آورده شده است. در این نمودار، محور قائم نشان دهنده ماکزیمم تراز رسوبگذاری

پایین دست و پر و خالی شدن حفره آبستگي سبب می‌شود که ماکزیمم عمق آبستگي حول یک مقدار میانگین نوسان کند. در موقعیت ۶۰ درجه با استقرار گروه پایه (C-V) با افزایش سرعت بی بعد u/uc ، ماکزیمم عمق آبستگي نیز افزایش یافته است. به طوری که مقدار آن در شرایط جریان زلال، آستانه حرکت و بستر زنده به ترتیب برابر $3/4$ ، $3/7$ و $4/2$ برابر قطر پایه است. علت این امر را می‌توان این‌گونه متصور شد که پایه‌های (C-V) سبب انحراف شدیدتر جریان به ساحل خارجی می‌شوند و هم‌چنان که پژوهشگران پیشین اشاره نموده‌اند زاویه ۶۰ درجه دارای ماکزیمم تنش برشی در بستر است. تأثیر همزمان موارد ذکر شده سبب ایجاد ماکزیمم عمق آبستگي در آزمایش (C-V)L60 شده است.

شکل ۱۰. ماکزیمم عمق بی بعد شده حفره آبستگي نسبت به موقعیت شکل‌گیری آن

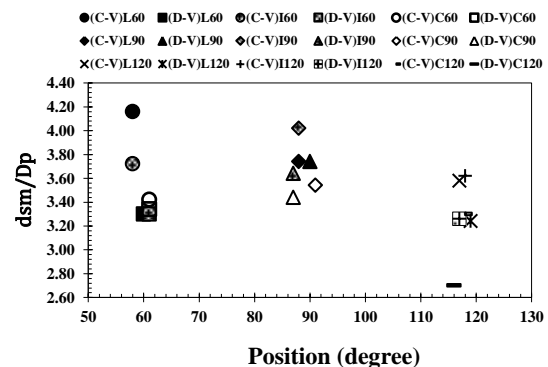


Fig. 10. The relative maximum scour hole depth against the position where it was generated

عمق ماکزیمم چاله دوم آبستگي به صورت بی‌بعد شده نسبت به قطر پایه در نمودار شکل (۱۱) آورده شده است. با توجه به شکل (۱۱) ماکزیمم عمق چاله دوم آبستگي در همه آزمایش‌ها معادل $3/72$ برابر قطر پایه بوده که در فاصله-ای معادل ۳۱ برابر قطر پایه از مرکز استقرار پایه‌ها در آزمایش (C-V)I90 ایجاد شده است. این مقدار در ۹۰ درصدی عرض کانال از ساحل داخلی اندازه گرفته شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود کمترین عمق چاله دوم آبستگي نیز متعلق به آزمایش (C-V)C90 بوده که معادل $0/96$ قطر پایه است. محل ایجاد ماکزیمم عمق چاله دوم آبستگي در فاصله ۱۵ تا ۷۴ برابر قطر پایه در پایین دست محل پایه‌هاست. از آن جا

شکل (۱۴) میزان پیشروی تغییرات بستر در انتهای آزمایش به ازای شرایط جریان مختلف را نشان می‌دهد. پارامتر Lm طول تغییرات بستر در پایین دست را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۴) روند تغییرات بستر در شرایط جریان مختلف برای هر دو گروه پایه (C-V) و (D-V) در موقعیت ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه، با افزایش نسبت u/uc طول این تغییرات در پایین دست پایه‌ها افزایش داشته است. بیشترین طول پیشروی تغییرات بستر مربوط به آزمایش‌های انجام شده در شرایط بستر متحرک در موقعیت ۶۰ درجه است. این مقدار در هر دو گروه پایه یکسان است. کمترین مقدار این پارامتر نیز با قرارگیری گروه پایه (C-V) در موقعیت ۱۲۰ درجه و در شرایط جریان زلال به وقوع پیوسته است.

شکل ۱۴. روند پیشروی تغییرات بستر در شرایط جریان مختلف

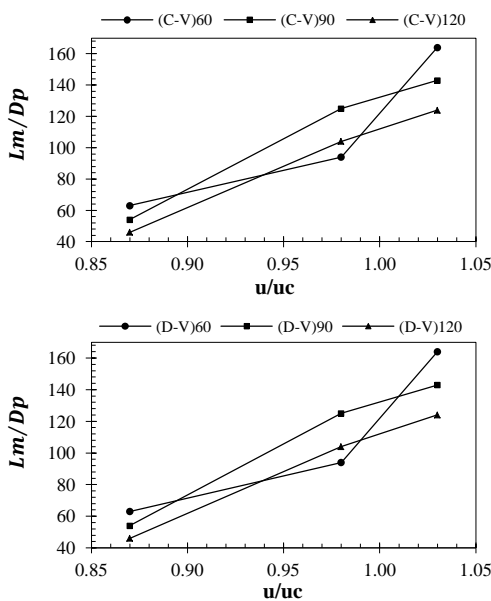


Fig. 14. Progression of bed variations under different flow conditions

به منظور بیان بهتر ابعاد حفره آبستگي ایجاد شده حول پایه‌ها، از مستطیل محیط بر حفره آبستگي استفاده شده است. در این حالت نقاط دارای آبستگي بیش از ۵۰ درصد قطر پایه‌ها، در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۱۵) ابعاد اندازه-گیری شده حفره آبستگي رسم شده است. بیشترین طول و

(h_{max}) است که با قطر پایه (D_p) بی بعد شده است. از آن جا که پایه‌ها در موقعیت‌های مختلف قرار گرفته‌اند، به منظور مقایسه بهتر، فاصله ایجاد ماکزیمم تراز رسوبگذاری از مرکز قرارگیری پایه‌ها نسبت به قطر پایه (D_p) بی بعد شده است. همان‌گونه که مشخص است ماکزیمم تراز رسوبگذاری در آزمایش (D-V)L60 معادل $3/2$ برابر قطر پایه شکل گرفته است. همچنین کمترین ارتفاع رسوبگذاری معادل $1/46$ برابر قطر پایه مربوط به آزمایش (C-V)C120 است. ماکزیمم تراز رسوبگذاری در u/uc های مختلف با استقرار گروه پایه (D-V) ایجاد شده است. می‌توان گفت پایه‌های (D-V) افزایش انحراف جریان در مجاورت بستر به سمت ساحل داخلی را سبب می‌شود. در هر دو گروه پایه (C-V) و (D-V)، ماکزیمم تراز رسوبگذاری با استقرار پایه‌ها در موقعیت ۶۰ درجه ایجاد شده است. از دیگر نکات قابل ذکر می‌توان گفت که با تغییر موقعیت استقرار پایه‌ها از ۶۰ به ۹۰ و ۱۲۰ درجه، ماکزیمم تراز رسوبگذاری در فاصله نزدیکتری به محل استقرار گروه پایه‌ها شکل می‌گیرد. می‌توان اظهار داشت با استقرار پایه‌ها در موقعیت ۶۰ درجه، جریان ثانویه زمان و فاصله کافی برای حمل مصالح به پایین دست در مجاورت ساحل داخلی را داراست. همچنین در نیمه دوم قوس در پایین دست پایه‌ها قدرت جریان ثانویه کاهش می‌یابد. این امر در رسوبگذاری مجاور ساحل داخلی اثرگذار است.

شکل ۱۳. ارتفاع بی بعد شده ماکزیمم رسوبگذاری نسبت به محل شکل-

گیری آن

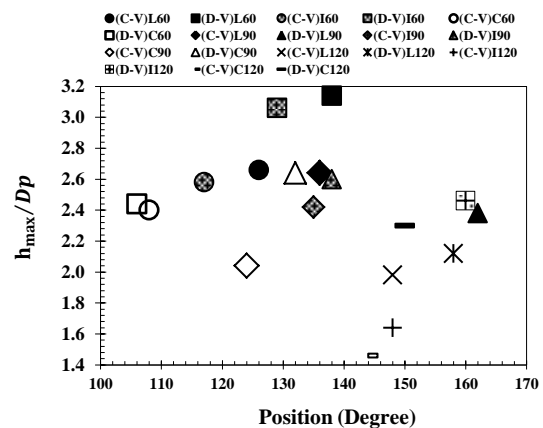


Fig. 13. The maximum relative height of sedimentation against the position of its occurrence

جریان زلال به آستانه حرکت، افزایش مساحت حفره آبستگي را سبب شده است. در هر سه موقعیت و به ازای هر دو گروه پایه این افزایش مشاهده می‌شود.

شکل ۱۶. مساحت بی بعد شده حفره آبستگي حول پایه‌ها به ازای سرعت بی بعد (u/uc) ، (الف) گروه پایه (C-V) (ب) گروه پایه (D-V)

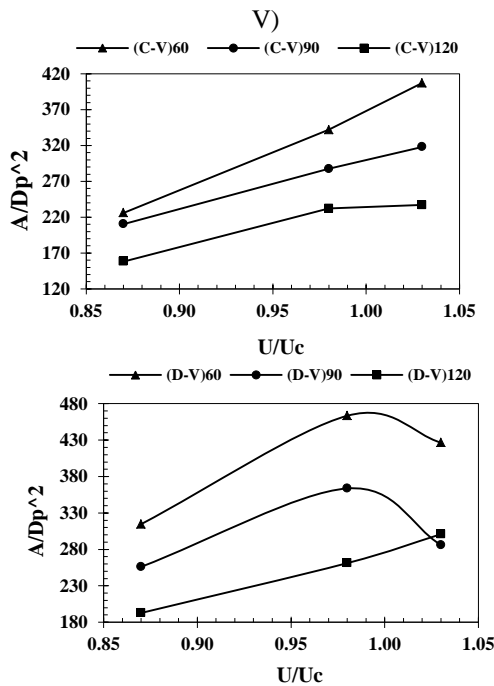


Fig. 16. The relative area of scour hole around the piers per nondimensionalized velocity (u/uc)

همچنین در شرایط جریان زلال و آستانه حرکت تغییر موقعیت محل استقرار گروه پایه از زاویه ۶۰ درجه به ۹۰ و ۱۲۰ درجه مساحت حفره آبستگي را کاهش داده است. با تغییر رژیم جریان به بستر متحرک در آزمایش‌های مربوط به گروه پایه (C-V) در هر سه موقعیت استقرار گروه پایه‌ها، افزایش مساحت چاله آبستگي مشاهده می‌شود.

پروفیل عرضی مقطع گذرنده از مرکز استقرار گروه پایه‌ها در شکل (۱۷) آورده شده است. پروفیل مزبور نشان می‌دهد که در گروه پایه (D-V) در موقعیت ۶۰ درجه با $S/D_p=2.4$ مصالح مجاور دیواره ساحل خارجی نیز توسط جریان شسته شده و به پایین دست منتقل شده‌اند. در موقعیت ۹۰ و ۱۲۰ درجه نیز همین گروه پایه با $S/D_p=2.4, 3.6$ سبب آبستگي مصالح مجاور ساحل خارجی شده است.

عرض حفره آبستگي به ازای آزمایش (D-V)I60 ایجاد شده است.

همچنین کمترین اندازه طول و عرض حفره آبستگي مربوط به آزمایش (C-V)C120 است. از جمله نکاتی که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود کمتر بودن طول حفره آبستگي نسبت به عرض آن در محل استقرار پایه‌ها در موقعیت ۱۲۰ درجه است. در هر دو گروه پایه و در رژیم‌های متفاوت جریان این روند مشاهده شده است.

شکل ۱۵. ابعاد بی بعد شده مستطیل محیط شده بر حفره آبستگي حول گروه پایه‌ها در شرایط متفاوت جریان و در موقعیت‌های مختلف

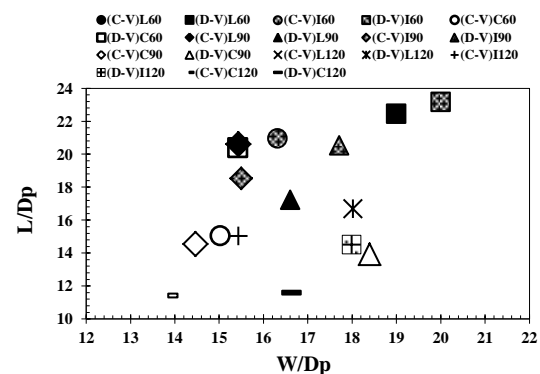
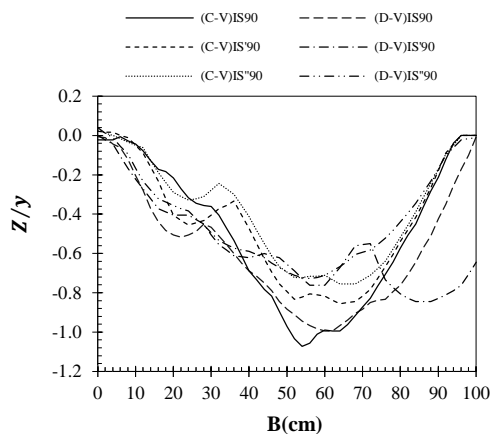


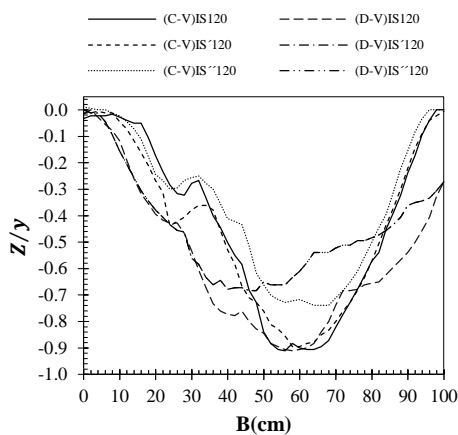
Fig. 15. The relative dimensions of the rectangle circumscribed over the scour hole around the pier group under different flow conditions and in different positions

در هر سه موقعیت، عرض حفره گروه پایه (D-V) نسبت به گروه پایه (C-V) بیشتر است. دلیل تفاوت عرض حفره در دو گروه پایه را می‌توان چگونگی چیدمان گروه پایه (D-V) دانست. در این گروه پایه با افزایش فرسایش حول پایه‌ها، فاصله پایه عمودی پایه‌های کج مجاور آن افزایش می‌یابد. این افزایش فاصله در عرض کانال سبب افزایش در عرض حفره شده است.

مساحت حفره‌های آبستگي به ازای سرعت بدون بعد (u/uc) و در موقعیت‌های مختلف در شکل (۱۶) نمایش داده شده است. مساحت (A) با توان ۲ قطر پایه‌ها بی‌بعد شده است. در شکل مذکور می‌توان ملاحظه نمود در هر دو گروه پایه کمترین مساحت مربوط به پایه‌ها موقعیت ۱۲۰ درجه است. همچنین ماکزیمم مقدار مساحت مربوط به آزمایش با پایه‌ها در موقعیت ۶۰ درجه است. تغییر رژیم جریان از



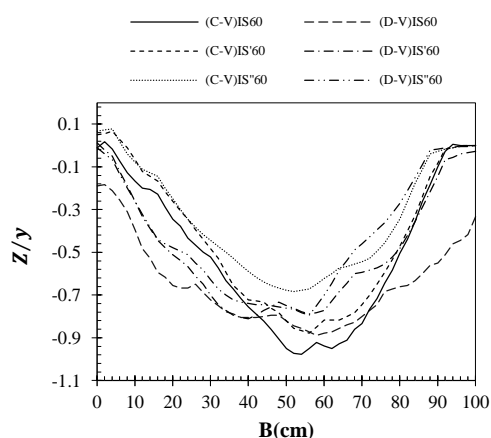
(ب) قرارگیری گروه پایه‌ها در موقعیت ۹۰ درجه



(ج) قرارگیری گروه پایه‌ها در موقعیت ۱۲۰ درجه

چگونگی چیدمان گروه پایه (D-V) به گونه‌ایست که با افزایش عمق آبستگي فاصله پایه عمودی و پایه‌های کج مجاور آن افزایش می‌یابند. این امر سبب افزایش ابعاد حفره آبستگي در این گروه پایه نسبت به گروه پایه (C-V) می‌شود. اگرچه در نهایت ماکزیم عمق آبستگي در گروه پایه (C-V) از مقادیر بیشتری برخوردار است. گروه پایه (C-V) دارای حفره آبستگي نسبتاً متقارنی است

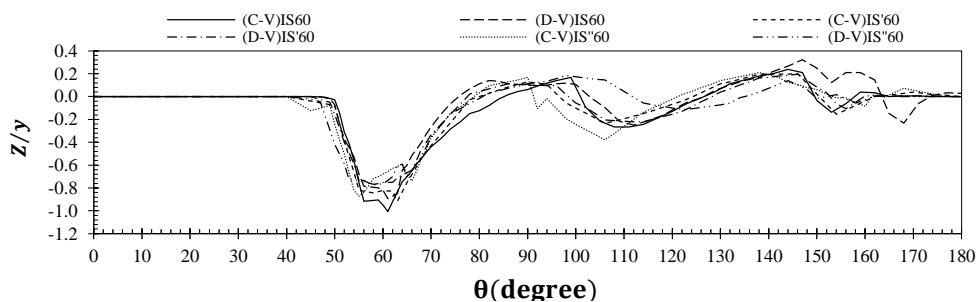
شکل ۱۷. نمونه‌ای از پروفیل‌های عرضی بی بعد شده با عمق جریان، با گروه پایه‌ها در موقعیت‌های مختلف



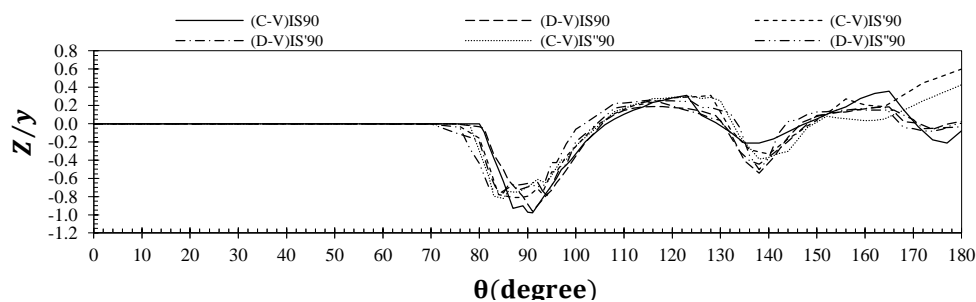
(الف) قرارگیری گروه پایه‌ها در موقعیت ۶۰ درجه

Fig. 17. Lateral bed profiles, under different pier positions

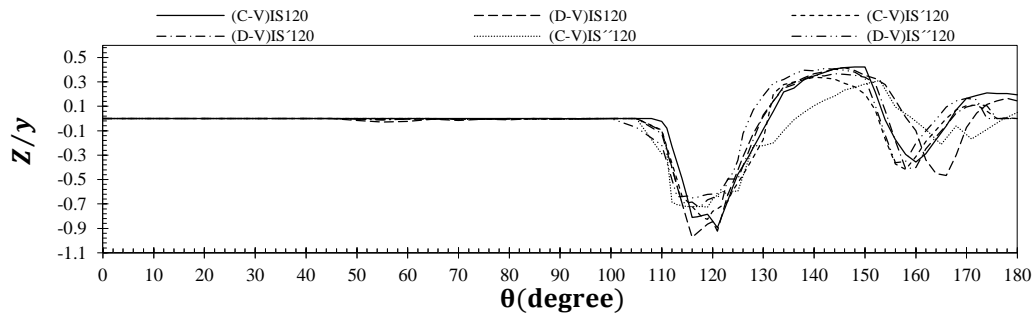
شکل ۱۸. نمونه‌ای از پروفیل‌های طولی بستر در ۵۰ درصدی عرض کانال از ساحل داخلی، در موقعیت‌های مختلف قرارگیری گروه پایه‌ها



(الف) قرارگیری گروه پایه‌ها در موقعیت ۶۰ درجه



(ب) قرارگیری گروه پایه‌ها در موقعیت ۹۰ درجه



(ج) قرارگیری گروه پایه‌ها در موقعیت ۱۲۰ درجه

Fig. 18. Longitudinal bed profiles at the channel center line, under different pier positions

در همه آزمایش‌ها ماکزیمم عمق آبستکی در مجاورت پایه کج نزدیک به ساحل خارجی و در ردیف اول اندازه‌گیری شده است.

ماکزیمم عمق حفره دوم آبستکی در آزمایش گروه پایه همگرا-عمودی در رأس قوس و در شرایط آستانه حرکت ایجاد شده است. در فاصله ۲۵ تا ۳۵ برابر قطر پایه از محل استقرار پایه‌ها، بیشترین تعداد ماکزیمم عمق آبستکی حفره دوم مشاهده می‌شود.

در هر دو گروه پایه کمترین مساحت حفره آبستکی مربوط به موقعیت ۱۲۰ درجه است. همچنین ماکزیمم مقدار مساحت آبستکی، مربوط به آزمایش‌های موقعیت ۶۰ درجه است. تغییر رژیم جریان از جریان زلال به آستانه حرکت، افزایش مساحت حفره آبستکی را سبب شده است. در هر سه موقعیت و به ازای هر دو گروه پایه این افزایش مشاهده می‌شود.

با تغییر موقعیت استقرار پایه‌ها از ۶۰ به ۹۰ و ۱۲۰ درجه، ماکزیمم تراز رسوبگذاری در فاصله نزدیک‌تری به محل استقرار گروه پایه‌ها شکل می‌گیرد. به طور متوسط این فاصله در سه موقعیت مذکور به ترتیب معادل ۴۲، ۲۸ و ۲۲ برابر قطر پایه بدست آمد.

ماکزیمم تراز رسوبگذاری در شرایط بستر زنده در موقعیت ۶۰ درجه با قرارگیری گروه پایه واگرا-عمودی، معادل ۳/۲ درصد قطر پایه شکل گرفته است. همچنین کمترین ارتفاع رسوبگذاری معادل ۱/۵ درصد قطر پایه، مربوط به آزمایش گروه پایه همگرا-عمودی در شرایط جریان زلال و در موقعیت ۱۲۰ درجه است.

شکل (۱۸) پروفیل‌های طولی بستر در محور مرکزی کانال (۵۰ درصدی عرض کانال از ساحل داخلی) را نشان می‌دهد. این پروفیل از پایه‌های عمودی عبور می‌کند. در اینجا نیز تغییرات ناشی از افزایش فاصله دو ردیف پایه‌ها، سبب کاهش یا افزایش عمق حفره یا تراز پشته رسوبی شده است. در هر موقعیت، تغییر کلی در نوع شکل پروفیل‌های طولی و شیب حفره‌ها رخ نداده است.

اگر چه شیب حفره آبستکی با تغییر موقعیت استقرار پایه‌ها از نیمه اول قوس به نیمه دوم به تدریج کاهش می‌یابد. شیب دیواره بالادست حفره آبستکی پیرامون گروه پایه‌ها، در موقعیت ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب حدود ۳۰، ۲۴ و ۲۱ درجه اندازه‌گیری شد. این شیب برای هر دو گروه پایه تقریباً یکسان است. می‌توان گفت کج شدگی پایه‌ها تغییری در شیب بالادست حفره ایجاد نکرده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

ماکزیمم عمق آبستکی در گروه پایه همگرا-عمودی در موقعیت ۶۰ درجه و تحت شرایط بستر زنده بوده که معادل ۴/۲ درصد قطر پایه اندازه‌گیری شده است.

در هر دو گروه پایه، تغییر موقعیت از ۶۰ به ۹۰ درجه افزایش و از ۹۰ به ۱۲۰ درجه کاهش ماکزیمم عمق آبستکی را در پی داشته است. به غیر از تغییر موقعیت گروه پایه (C-V) از ۶۰ به ۹۰ درجه در شرایط بستر زنده، که کاهش ماکزیمم عمق آبستکی را سبب شده است.

اعلام تعارض منافع

نویسنده(نویسندگان) اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض

منافعی وجود ندارد.

مراجع

References

- [16] Bozkus Z. & Çeşme M. 2010 Reduction of scouring depth by using inclined piers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **37**(12), 1621-1630.
- [17] Eghbalnik L, Vaghefi M. & Golbaharhaghighi M. R. 2016 Experimental investigation of scour pattern around the group of three divergent-vertical and convergent-vertical bridge piers in a 180 degree sharp bend. *Journal of Hydraulics*, **11**(3), 73-79, (In Persian).
- [18] Vaghefi M., Ghodsian M. & Salimi S. 2016 The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour. *Sadhana*, **41**(1), 75-86.
- [19] Vaghefi M., Ghodsian M. & Salimi S. 2016 Scour formation due to laterally inclined circular pier. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**(4), 1311-1318.
- [20] Ben Mohammad Khajeh S., Vaghefi M. & Mahmoudi A. 2017 The scour pattern around an inclined cylindrical pier in a sharp 180-degree bend: an experimental study. *International Journal of River Basin Management*, **15**(2), 207-218.
- [21] Leschziner M. A. & Rodi W. 1979 Calculation of strongly curved open channel flow, *Journal of the Hydraulics Division*, **105**(10), 1297-1314.
- [22] Raudkivi A. J. & Ettema R. 1983 Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**(3), 339-350.
- [23] Chiew Y. M. 1984 Local scour at bridge piers. *PhD Thesis, University of Auckland*.
- [1] Simons D. B. & Senturk F. 1992 Sediment transport technology: water and sediment dynamics. *Technology & Engineering*, Water Resources Publication, Littleton, Colorado, USA.
- [2] Parker, G. W. 1998 Comparison of erosion and channel characteristics. *Water Resources Engineering*, 315-319.
- [3] Dargahi B. 1990 Controlling mechanism of local scouring. *Journal of Hydraulic Engineering*, **116**(10), 1197-1214.
- [4] Chabert J. & Engeldinger P. 1956 Etude des affouillements autour des piles des ponts. Report Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France.
- [5] Shen H. W., Schneider V. R. & Karaki S. S. 1966 Mechanics of local scour. Institute for Applied Technology, U.S. Department of Commerce. National Bureau of Standards.
- [6] Chiew Y. M. & Melville B. W. 1987 Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, **25**(1), 15-26.
- [7] Melville B. W. & Sutherland A. J. 1988 Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, **114**(10), 1210-1226.
- [8] Dey S., Bose S. K. & Sastry G. L. 1995 Clear water scour at circular piers: a model. *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**(12), 869-876.
- [9] Melville B. W. & Chiew Y. M. 1999 Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, **125**(1), 59-65.
- [10] Oliveto G. & Hager W. H. 2002 Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**(9), 811-820.
- [11] Sheppard, D.M. and Miller Jr, W. 2006 Live-bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**(7), 635-642.
- [12] Fael C., Lança R. & Cardoso A. 2016 Effect of pier shape and pier alignment on the equilibrium scour depth at single piers. *International Journal of Sediment Research*, **31**(3), 244-250.
- [13] Masjedi A. M., Bejestan S. & Kazemi H. 2010 Effects of bridge pier position in a 180 degree flume bend on scour hole depth. *Journal of Applied Sciences*, **10**(8), 670-675.
- [14] Vaghefi M., Tabib Nazhad Motlagh M. J., Hashemi S. S. & Moradi S. 2018 Experimental study of bed topography variations due to placement of a triad series of vertical piers at different positions in a 180° bend. *Arabian Journal of Geosciences*, **5**(11), 102.
- [15] Bozkus Z. & Yildiz O. 2004 Effects of inclination of bridge piers on scouring depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**(8), 827-832.

The Effect of Flow Conditions on Bed Topography in a 180 Degree Bend Containing Sextuple Inclined-Vertical Pier Groups in Perpendicular to the Flow

Leila Eghbalnik¹, Mohammad Vaghefi^{2*}, Mohammad Reza Golbahar Haghighi³

- 1- M.Sc. of Civil Engineering, Hydraulic Structures, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.
- 2- Assoc. Prof. Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.
- 3- Assoc. Prof. Department of Mechanics Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

vaghefi@pgu.ac.ir*

Abstract:

Construction of inclined piers has been observed in a great number of bridges worldwide today. With installation of the bridge piers on river path, the simple and steady flow pattern reaching the pier undergoes intense and complicated changes. Complicated vortex systems created around the pier dig around the pier a hole called a scour hole. Expansion of such a hole around the piers empties the foundations from beneath, leading to consequent destruction of the foundations and the bridge. Whereas, few studies have been conducted to address scour at inclined piers. This issue was investigated in light of the significance of severe damages caused by the scouring phenomenon, the construction of vertical-inclined piers and their untold effects specifically in meandering paths. In this study, the effect of different arrangements of inclined and vertical bridge piers (in convergent and divergent fashions), installed at the vane vertical to the flow, was analyzed along with the effect of flow conditions and the position of the pier groups at the 180 degree sharp bend on parameters such as the maximum scour depth, the maximum sedimentation level, the scour hole dimensions, etc. in the laboratory. To conduct the experiments, a channel consisting of a 180 degree sharp bend was utilized. Due to its 2-meter-long central curvature radius, it is classified as a sharp bend. The channel contains upstream and downstream straight ends respectively as long as 5 and 6.5 meters. The experiments were carried out under clear water (where u/uc is equal to 0.87), incipient motion ($u/uc = 0.98$), and mobile bed ($u/uc = 1.03$) conditions. Two vertical and four inclined piers formed the pier group. The diameter of the piers was selected 5 cm and their inclination angle was 21 degrees. The pier groups were placed at the 60, 90, and 120 degree positions of the bend. Results indicated that the maximum scour depth and level of sedimentation occurred at the 60 degree position under live bed conditions. These values were measured equal to 4.2 and 3.2 times the pier diameter. In every three position of the installation of the piers at the bend, the maximum scour depth occurred due to position of the convergent-vertical pier group. However, the maximum sedimentation level occurred in the case of positioning the divergent-vertical pier group. In both pier groups, the maximum scour depth occurred in the vicinity of the inclined pier near the outer bank in the first row. Changing the position of the piers from the 60 to 90 and 120 degree angles leads the maximum sedimentation level to occur at a distance closer to the vicinity of the pier group. Such a distance was obtained in those three positions to be respectively 42, 28, and 22 times the pier diameter on the average. In both pier groups, the minimum area of the scour hole occurred at the 120 degree position. Further, the maximum area was observed in the experiments on the 60 degree position. Shifting the flow regime from the clear flow to incipient motion resulted in an increase in the area of the scour hole. Such an increase is observed in every three position per both pier groups.

Keywords: Scour, Sextuple pier groups, Bed topography, Sharp 180-degree bend, u/uc .