

مطالعه‌ی آزمایشگاهی الگوی آب‌شستگی ناشی از استقرار پایه‌های دوتایی هم‌گرا و واگرا و هم‌راستا با جریان در موقعیت‌های مختلف قوس ۱۸۰ درجه

مسعود موسائی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد واقفی* (دانشیار)

سید حامد معراجی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۶ (دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۶۱-۷۰)

آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌ی پل، پدیده‌ی است که اگر به درستی به آن پرداخته نشود، می‌تواند باعث تخریب پل شود. در پژوهش حاضر، به بررسی الگوی آب‌شستگی پیرامون زوج پایه‌های هم‌گرا و واگرا (شکل ۸ و شکل ۷) مستقر در موقعیت‌های مختلف قوس تند ۱۸۰ درجه پرداخته شده است. کانال مورد استفاده با زاویه‌ی قوس ۱۸۰ درجه، عرض ۱ متر و شعاع مرکزی ۲ متر در رده‌ی قوس‌های تند قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها در شرایط آستانه‌ی حرکت با قطر مصالح ۱٫۵ میلی‌متر انجام شده و نتایج به دست آمده نشان داده‌اند که شکل پایه در نحوه‌ی آب‌شستگی تأثیر به‌سزایی دارد و می‌تواند باعث تغییر موقعیت عمق بیشینه از پایه‌ی اول به پایه‌ی دوم و بالعکس شود. عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی با استقرار زوج پایه‌ی V شکل در موقعیت ۹۰ درجه اندازه‌گیری شده است که معادل ۰٫۹۷٪ عمق جریان است. بحث و نتیجه‌گیری تفصیلی پیرامون آزمایش‌ها در نوشتار حاضر ارائه شده است.

واژگان کلیدی: آب‌شستگی، زوج پایه‌ی کج، قوس تند ۱۸۰ درجه، زمان تعادل نسبی، توپوگرافی بستر.

۱. مقدمه

رودخانه‌ها اغلب مسیر غیرمستقیم و به اصطلاح متانداری دارند. در بسیاری از موارد به دلیل محدودیت احداث راه، طراحان ناگزیر به استقرار پل بر روی قوس رودخانه می‌شوند. الگوهای جریان و آب‌شستگی ایجاد شده در اطراف پایه‌ها در مسیر قوسی شکل نسبت به مسیر مستقیم بسیار متفاوت هستند. در مسیر قوسی شکل، به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز، جریان ثانویه پدید می‌آید. این جریان‌ها در نزدیکی بستر به سمت ساحل داخلی و در ترازهای فوقانی به سمت ساحل خارجی در حرکت هستند. از ترکیب جریان ثانویه با پروفیل طولی سرعت، جریان حلزونی شکل می‌گیرد. برخورد این جریان‌ها با پایه باعث پیچیده‌تر شدن الگوی جریان و در نتیجه متفاوت بودن الگوی آب‌شستگی نسبت به مسیر مستقیم است. مطالعه‌ی دقیق‌تر بر روی پارامترهای مؤثر در تغییرات توپوگرافی بستر همچون بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی اطراف پایه‌ها و تغییرات در سواحل داخلی و خارجی از جمله رویدادهایی هستند که در مسیر قوسی شکل باید به آنها پرداخته شود.

در زمینه‌ی الگوی آب‌شستگی در قوس تند، پژوهش‌های بسیار جزئی صورت

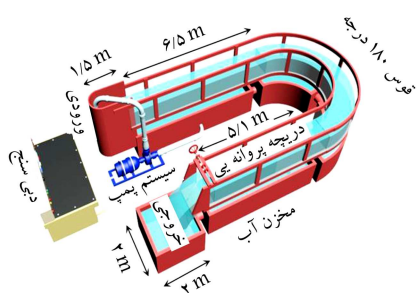
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۰/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۲۵، پذیرش ۱۳۹۵/۲/۷.

siavash.mnmg@yahoo.com
vaghefi@pgu.ac.ir
h.meraji@pgu.ac.ir

گرفته است. در ادامه، برخی از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی پایه‌ی پل به صورت خلاصه ارائه شده‌اند. در پژوهشی در سال ۱۹۹۵، در بررسی الگوی آب‌شستگی اطراف پایه‌ی استوانه‌یی، عمق چاله‌های آب‌شستگی در مدل آزمایشگاهی‌شان گزارش شده است.^[۱] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی (۱۹۹۸)، نیز چرخش پایه حول محور اصلی‌اش بررسی و نشان داده شد که زاویه‌ی چرخش در مقدار آب‌شستگی بسیار اثرگذار است و در نهایت، ارائه‌ی یک ضریب اصلاح بر حسب زاویه‌ی چرخش، غلط شناخته شد و پارامترهایی نظیر نسبت عرض پایه به عرض کانال و همچنین نسبت عرض پایه به طول آن مؤثر تشخیص داده شد.^[۲] در مطالعه‌ی آزمایشگاهی دیگری (۱۹۹۹)، به محاسبه‌ی زمان آب‌شستگی اطراف پایه‌ی پل پرداخته شد و پارامترهای موردنیاز برای تخمین زمان تعادل آب‌شستگی معرفی و همچنین رابطه‌ی برای به دست آوردن زمان تعادل ارائه شد که با استفاده از آن می‌توان زمان آزمایش‌های آب‌شستگی را بسیار کاهش داد.^[۳] در سال ۲۰۰۴، در یک کانال مستقیم با استفاده از تک پایه‌ی کج در راستای جریان نتیجه گرفته شد که با افزایش زاویه‌ی پایه به سمت پایین دست، مقدار آب‌شستگی کاهش پیدا می‌کند.^[۴]

همچنین در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی (۲۰۰۸) در مورد آب‌شستگی اطراف



شکل ۱. تصاویر واقعی و سه‌بعدی از کانال [۹].

چاله‌ی آب‌شستگی بی‌اثر می‌شود. [۱۳] براساس مطالعات ملویل و چوو (۱۹۹۹)، در صورتی که سرعت متوسط جریان (u) از سرعت بحرانی (u_c) بیشتر باشد، آب‌شستگی در شرایط بستر زنده رخ می‌دهد و آب‌شستگی آب زلال موقعی ایجاد می‌شود که سرعت متوسط جریان در محدوده‌ی $1 < u/u_c < 3$ باشد. لذا بر این اساس، تمام آزمایش‌ها با عمق جریان ۱۸ سانتی‌متر در ابتدای قوس و u/u_c برابر ۰/۹۸ انجام شده است. [۱۴]

طبق توصیه‌های چوو و ملویل برای از بین بردن تأثیر دیواره‌های کانال در آب‌شستگی موضعی، قطر پایه نباید از ۱۰٪ عرض کانال بیشتر باشد. [۱۰] لذا برای مدل کردن پایه‌ی پل، از لوله‌ی استوانه‌یی به قطر ۵ سانتی‌متر استفاده شده است. پایه‌ها به صورت دوتایی و با زاویه‌ی انحراف ۲۱ درجه نسبت به خط عمود به صورت Δ شکل (هم‌گرا) و ∇ شکل (واگرا) در صفحه‌ی موازی با جریان استفاده شده‌اند (شکل ۲).

برای انجام آزمایش‌ها، پس از استقرار پایه‌ی موردنظر، رسوبات کف توسط ارابه‌ی تسطیح متحرک به‌طور یکسان در جهت طولی و عرضی در سراسر فلوام گسترانده شدند (شکل ۱). پیش از راه‌اندازی پمپ، دریچه‌ی انتهایی بسته و سپس آب به آرامی به درون کانال هدایت شد تا از ایجاد ریبیل و ناهمواری در سطح بستر جلوگیری شود. پس از بالا آمدن آب و اطمینان از مرطوب شدن رسوبات بعد از گذشت چند دقیقه، پمپ با دبی کمی راه‌اندازی و به آرامی دبی ب ه میزان موردنظر رسانده شد. سپس با تنظیم دقیق و همزمان دبی پمپ و دریچه‌ی پایین‌دست، عمق جریان در ابتدای قوس ۱۸ سانتی‌متر و دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه حاصل شد. در انتهای هر آزمایش پس از خاموش کردن پمپ، آب به آرامی زهکشی شد تا از اعمال تغییرات ناخواسته به بستر جلوگیری شود. پس از تخلیه‌ی کامل آب از درون کانال، توپوگرافی بستر به وسیله‌ی متر لیزری با دقت ۱ میلی‌متر در تمامی نواحی تغییر شکل یافته از جمله مسیر مستقیم پایین‌دست اندازه‌گیری شد.

تغییرات شبکه‌بندی در قوس کانال در راستای طولی (زاویه‌یی) برابر ۳ درجه و برای راستای عرضی (شعاعی) برابر ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که این تغییرات

پایه‌ی پل در قوس ۱۸۰ درجه‌ی کانال، این نتیجه به‌دست آمد که بیشترین مقدار آب‌شستگی در زاویه‌ی ۶۰ درجه از ابتدای قوس کانال رخ می‌دهد و چاله‌ی آب‌شستگی به دیواره‌ی بیرونی قوس متمایل می‌شود. [۵] نتایج مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۰، نشان داد که بیشترین آب‌شستگی در زاویه‌ی ۶۰ درجه مشاهده می‌شود و با افزایش عدد فرود، آب‌شستگی در تمامی نواحی افزایش یافته و همچنین فرمول ارائه‌شده‌ی در سال ۱۹۹۹، تطابق خوبی با مشاهدات صورت گرفته داشته است. [۶]

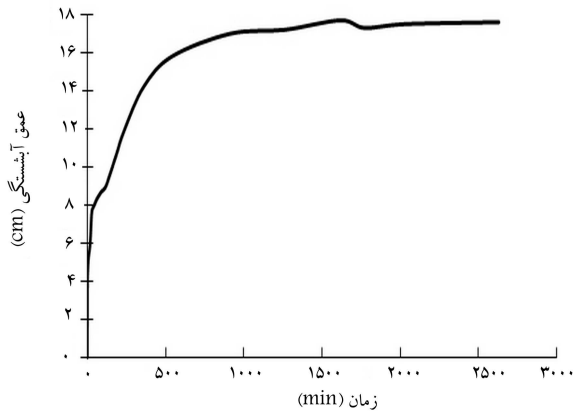
نتایج مطالعه در بررسی زوج پایه‌ی پل کج در مسیر مستقیم در سال ۱۳۹۲، نشان داد که عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در گروه پایه افزایش می‌یابد، همچنین اثرگذاری گروه پایه‌ها بر الگوی آب‌شستگی نشان داده شد. [۷] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۵ نیز با استفاده از تک‌پایه‌ی کج مستقیم در مسیر مستقیم به عرض ۶۰ سانتی‌متر به بررسی الگوی آب‌شستگی پرداخته و از تک‌پایه با زاویه‌ی انحراف ۲۱ درجه نسبت به محور عمودی استفاده شد و نتایج به‌دست آمده نشان داد که زاویه‌ی انحراف پایه باعث تغییر شکل چاله‌ی آب‌شستگی می‌شود. [۸] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، در بررسی الگوی جریان در قوس تند ۱۸۰ درجه در حالت بستر صلب و با استفاده از دستگاه سرعت سنج ADV، نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین مقدار تنش برشی بستر در نیمه‌ی اول کانال و در زاویه‌ی ۴۰ درجه رخ می‌دهد. [۹] از نوآوری‌های پژوهش حاضر می‌توان به بررسی الگوی آب‌شستگی در قوس تند ۱۸۰ درجه با زوج پایه‌ی کج اشاره کرد. همچنین موقعیت‌های مختلف قوس به‌منظور استقرار زوج پایه‌ها مطالعه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوام قوسی شکل با زاویه انحنای ۱۸۰ درجه و مقطع مستطیلی شکل انجام شد. شعاع داخلی قوس ۱/۵ متر و شعاع خارجی آن برابر با ۲/۵ متر است. طول راستای مستقیم کانال در بالادست و پایین‌دست به ترتیب برابر ۶/۵ و ۵/۱ متر است. عرض کانال ۱ متر و ارتفاع آن ۷۰ سانتی‌متر است. همچنین جنس جداره از شیشه‌ی سکوریت ساخته شده است که توسط قاب‌های فولادی پایداری آن حفظ می‌شود. دبی جریان با استفاده از دبی‌سنج آلتراسونیک اندازه‌گیری شده و سپس مقدار آن به وسیله‌ی دستگاه تنظیم دور الکتروموتور قابل تغییر بوده است. در شکل ۱، نمونه‌ی تصاویر از کانال آزمایشگاهی ارائه شده است.

طبق پیشنهاد چوو^۱ و ملویل^۲، در شرایطی که نسبت قطر پایه به میانگین قطر ذرات رسوبی بیشتر از ۵۰ باشد، اندازه‌ی ذرات بستر در عمق آب‌شستگی بی‌اثر است. [۱۰] در همین راستا، رادکیوی^۳ و اتما^۴ نیز این نسبت را ۲۵-۳۰ پیشنهاد کرده‌اند. همچنین میزان انحراف معیار هندسی ذرات جهت حذف اثر غیریکنواختی رسوبات در کاهش آب‌شستگی نباید از ۱/۳ بیشتر باشد. آنها همچنین توصیه کرده‌اند که برای جلوگیری از تشکیل ریبیل، قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد. [۱۱] با توجه به این موارد، یک لایه از ماسه با قطر متوسط ۱/۵ میلی‌متر و ضریب انحراف معیار معادل ۱/۱۴ انتخاب و در لایه‌ی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است.

مطابق توصیه‌ی الیوتو^۵ و هاگر^۶ برای جلوگیری از اثرات زبری بستر، عمق آب را بیشتر از ۲۰ میلی‌متر پیشنهاد کرده‌اند. [۱۲] طبق توصیه‌ی چوو (۱۹۹۵)، چنانچه y/D بزرگ‌تر از ۳ باشد (y عمق جریان و D قطر پایه‌ها)، عمق آب بر روی عمق



شکل ۳. نمودار بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی نسبت به زمان برای آزمایش T۱.

۳. نتایج

در همه‌ی آزمایش‌ها پس از تنظیم دبی و عمق جریان، بلافاصله در اطراف پایه‌ها، گردابه‌ها تشکیل و آب‌شستگی با سرعت بسیار بالا آغاز شدند. با شکل‌گیری حفره‌ی آب‌شستگی، رسوبات بر خاسته از حفره به سمت پایین دست پایه‌ها و ساحل داخلی منتقل شدند. در شروع آزمایش، رسوبات برخاسته از حفره‌ی آب‌شستگی به محدوده‌ی می‌رسند که تأثیر پایه در آن محدوده کاهش می‌یابد و اثر گردابه‌های نعل اسبی پشت پایه ناچیز می‌شود. در این وضعیت، رسوبات انتقالی از حفره‌ی آب‌شستگی تحت تأثیر جریان ثانویه به سمت ساحل داخلی منتقل می‌شوند.

در شکل ۴، توپوگرافی بستر در آزمایش T۱ که مربوط به آزمایش تعیین زمان تعادل نسبی است، مشاهده می‌شود. همان‌طور که گفته شد، هدف از انجام آزمایش ذکر شده، تعیین زمان تعادل و تعادل نسبی به منشور انجام آزمایش‌های بعدی است. در آزمایش T۱، عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی ۹۸٪ عمق جریان در ابتدای قوس اندازه‌گیری شد. همچنین ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی برابر ۷٪ عمق جریان در ابتدای قوس بود، که در موقعیت ۱۴۸ درجه و تقریباً در فاصله‌ی معادل ۲ برابر قطر پایه از دیواره‌ی داخلی قرار داشت. چاله‌ی آب‌شستگی دوم و سوم به ترتیب در موقعیت‌های ۱۳۲ درجه تا ۱۵۶ درجه و ۱۶۸ درجه تا ۵۰ سانتی‌متر در مسیر مستقیم پایین دست و در مجاورت ساحل خارجی قرار داشتند. در بالادست پایه و در نزدیکی دیواره‌ی داخلی از موقعیت ۳۲ درجه تا ۸۸ درجه، شاهد رسوب‌گذاری مشاهده می‌شود. به دلیل طولانی بودن زمان آزمایش، حرکت رسوبات تا فاصله‌ی ۳ متری (۶۰ برابر قطر پایه) در مسیر مستقیم پایین دست ادامه داشت.

با توجه به شکل ۴، فرسایش در دو ناحیه‌ی متفاوت در مجاورت ساحل خارجی مشاهده می‌شود. این فرسایش در آزمایش قوس خالی مشاهده نمی‌شود و دلیل آن استقرار پایه و انحراف جریان ثانویه است. در شکل ۵، توپوگرافی بستر در آزمایش قوس بدون استقرار پایه ارائه شده است. در ادامه، آزمایش ذکر شده با نام اختصاری T۲ معرفی شده است، که به منظور شناخت تأثیرات قوس تند ۱۸۰ درجه بر روی توپوگرافی بستر انجام شده است. در آزمایش T۲، عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی برابر ۱٪ عمق جریان در ابتدای قوس در موقعیت ۵۳ درجه و در فاصله‌ی ۲۵٪ عرض کانال از ساحل داخلی اندازه‌گیری شده است. همچنین ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی در این آزمایش برابر با ۲۴٪ عمق جریان در ابتدای قوس بود که در موقعیت ۷۰ تا ۸۰ درجه و در فاصله‌ی ۴٪ از عرض کانال با جداری داخلی فاصله دارد. طبق مشاهدات آزمایشگاهی، پشته‌ی رسوبی ذکر شده در ۲٪ ابتدایی زمان



شکل ۲. نحوه‌ی قرارگیری پایه‌ها به صورت A و V در صفحه‌ی موازی با جریان.

در محدوده‌ی پایه‌ها در راستای طولی برابر ۱ درجه و برای راستای عرضی برابر ۱ سانتی‌متر افزایش داده شد. همچنین برای مسیر مستقیم پایین دست، تغییرات در راستای طولی برابر ۱۵ سانتی‌متر و برای راستای عرضی برابر ۴ سانتی‌متر انجام شد. در ابتدا، آزمایش‌های مقدماتی آب‌شستگی که شامل تعیین زمان تعادل و تعادل نسبی و همچنین آزمایش قوس بدون استقرار پایه به منظور شناخت شرایط آب‌شستگی در قوس تند بود، انجام شد. سپس با استقرار زوج پایه‌های هم‌گرا و واگرا (V شکل و A شکل) در ۳ موقعیت ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه از ابتدای قوس، آزمایش‌های آب‌شستگی انجام شدند.

به منظور محاسبه‌ی زمان تعادل و تعادل نسبی، یک آزمایش به مدت ۴۴ ساعت بر روی تک‌پایه‌ی عمود و در موقعیت ۹۰ درجه با دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. با توجه به توصیه‌ی چوو، اگر بعد از ۸ ساعت تغییرات عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی کمتر از ۱ میلی‌متر باشد، آزمایش به تعادل رسیده است؛^[۱۹] که در این آزمایش در ۱۰ ساعت پایانی تغییرات در چاله‌ی آب‌شستگی برابر ۱ میلی‌متر مشاهده شد. در نتیجه ۴۴ ساعت به‌عنوان زمان تعادل آزمایش در نظر گرفته شده است. در شکل ۳، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی نسبت به زمان در این آزمایش رسم شده است. با توجه به اینکه ۹۶٪ از آب‌شستگی در ۱۵ ساعت اولیه‌ی آزمایش رخ داده است، ۱۵ ساعت به‌عنوان زمان تعادل نسبی در نظر گرفته شد و در ادامه، تمامی آزمایش‌ها در مدت زمان ۱۵ ساعت انجام شده‌اند.

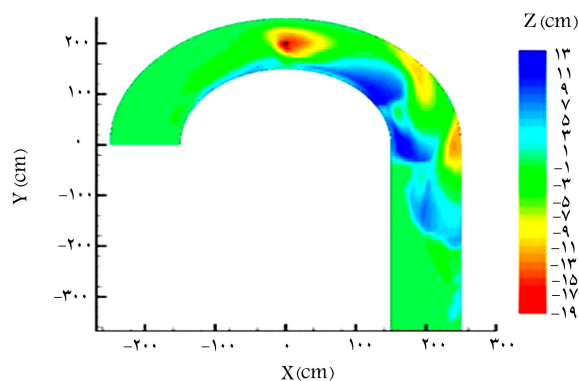
تأیید می‌شود. ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی برابر ۴۶٪ عمق جریان در ابتدای قوس بوده و در موقعیت ۱۳۳ درجه از ابتدای قوس و در مجاورت دیواره‌ی داخلی رخ داده است که نسبت به آزمایش T۱ به اندازه‌ی ۹ برابر قطر پایه به سمت بالادست جریان انتقال یافته است. همچنین در آزمایش I۹۰، رسوبات تا ۴۰ برابر قطر پایه در مسیر مستقیم پیش‌روی داشتند که این مقدار نسبت به آزمایش T۱ به اندازه‌ی ۲۰ برابر قطر پایه کاهش داشته است.

شکل ۷، توپوگرافی بستر در آزمایش‌های زوج پایه را نشان می‌دهد. طبق مشاهدات انجام شده در طول انجام آزمایش‌های جفت پایه می‌توان گفت که به‌طور میانگین در ۱۵٪ اولیه‌ی زمان آزمایش، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در مجاورت پایه‌ی دوم (پایه‌ی پایین دست) تغییر چندانی مشاهده نشده است. این امر به دلیل اثرگذاری پایه‌ی اول و همچنین انتقال مصالح فرسایش یافته از پایه‌ی اول به درون چاله‌ی تشکیل شده در اطراف پایه‌ی دوم است.

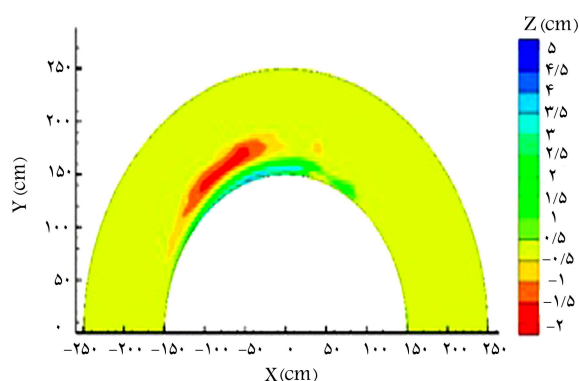
در شکل (الف) توپوگرافی بستر با زوج پایه‌ی V شکل، در موقعیت ۶۰ درجه و در صفحه‌ی موازی با جریان نمایش داده شده است (آزمایش V۶۰) که در آن ۴ پشته‌ی رسوبی مشاهده می‌شود. پشته‌ی رسوبی اول که در بالادست پایه‌ها و در مجاورت ساحل داخلی تشکیل شده است، در اثر تأثیرات قوس که در آزمایش T۲ به معرفی آن پرداخته شد، به وجود می‌آید. پشته‌ی رسوبی دوم نیز در اثر خروج رسوبات از چاله‌ی آب‌شستگی اطراف پایه‌ها تشکیل می‌شود. طبق مشاهدات آزمایشگاهی، رسوبات خروجی از چاله‌ی آب‌شستگی اطراف پایه‌ها تقریباً با زاویه‌ی ۱۵ درجه نسبت به خط مماس بر قوس از مرکز پایه‌ها به دیواره‌ی داخلی نزدیک می‌شدند. جهت حرکت رسوبات، نشان‌دهنده‌ی مقدار انحراف جریان در نزدیکی بستر به دلیل جریان‌های ثانویه است. عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی برابر ۸٪ عمق جریان در ابتدای قوس اندازه‌گیری شد، که در مجاورت پایه‌ی اول (پایه‌ی بالادست) رخ می‌دهد. همچنین ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی برابر ۵۶٪ عمق جریان در ابتدای قوس و در فاصله‌ی ۳۰ برابری قطر پایه‌ها از مرکز پایه‌ها به سمت پایین دست و در مجاورت دیواره‌ی داخلی مشاهده شده است (موقعیت ۱۱۱ درجه).

شکل (ب) توپوگرافی بستر با زوج پایه‌ی A شکل مستقر در موقعیت ۶۰ درجه است (A۶۰). در آزمایش مذکور، عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی برابر ۸۸٪ عمق جریان در ابتدای قوس اندازه‌گیری شده و محل وقوع آن در اطراف پایه‌ی پایین دست رخ داده است. این در حالی است که عمق چاله‌ی آب‌شستگی نسبت به آزمایش V شکل در همچنین موقعیتی، دارای افزایش ۸ درصدی بود. همچنین عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی از مجاورت پایه‌ی بالادست به پایه‌ی پایین دست انتقال یافته است. در ابتدای آزمایش نیز چاله‌ی آب‌شستگی مجاور پایه‌ی بالادست، عمق بیشتری نسبت به چاله‌ی آب‌شستگی مجاور پایه‌ی پایین دست داشت. این شرایط در ۳۰٪ ابتدای آزمایش برقرار بود و از آن زمان به بعد، چاله‌ی آب‌شستگی اطراف پایه‌ی پایین دست، عمق بیشتری نسبت به چاله‌ی آب‌شستگی پایه‌ی بالادست داشته است. ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی برابر ۶۰٪ عمق جریان در ابتدای قوس و در فاصله‌ی ۳۲ برابری قطری پایه‌ها به سمت پایین دست از مرکز پایه‌ها و در مجاورت دیواره‌ی داخلی حادث شده است (در موقعیت ۱۱۴ درجه از قوس).

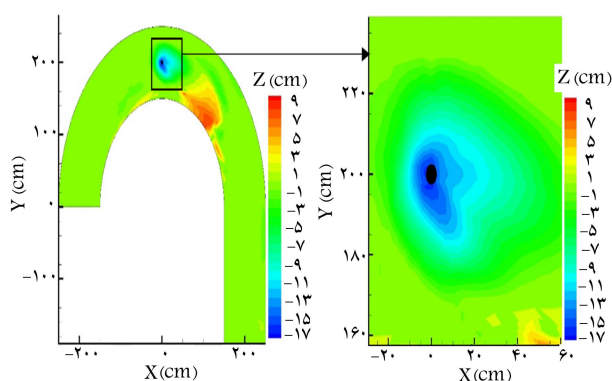
در شکل (ج) توپوگرافی بستر در آزمایش زوج پایه‌ی V شکل و مستقر در موقعیت ۹۰ درجه، در صفحه‌ی موازی با جریان مشاهده می‌شود (V۹۰) در آزمایش ذکر شده، عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی برابر ۹۷٪ عمق جریان در ابتدای قوس و در مجاورت پایه‌ی بالادست (محل عمق بیشینه‌ی چاله بر روی شکل نمایش داده شده است) مشاهده شد. همچنین ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی برابر ۵۸٪ عمق جریان در ابتدای قوس و در فاصله‌ی ۳۰ برابر قطر پایه از مرکز پایه‌ها



شکل ۴. توپوگرافی بستر در آزمایش T۱.



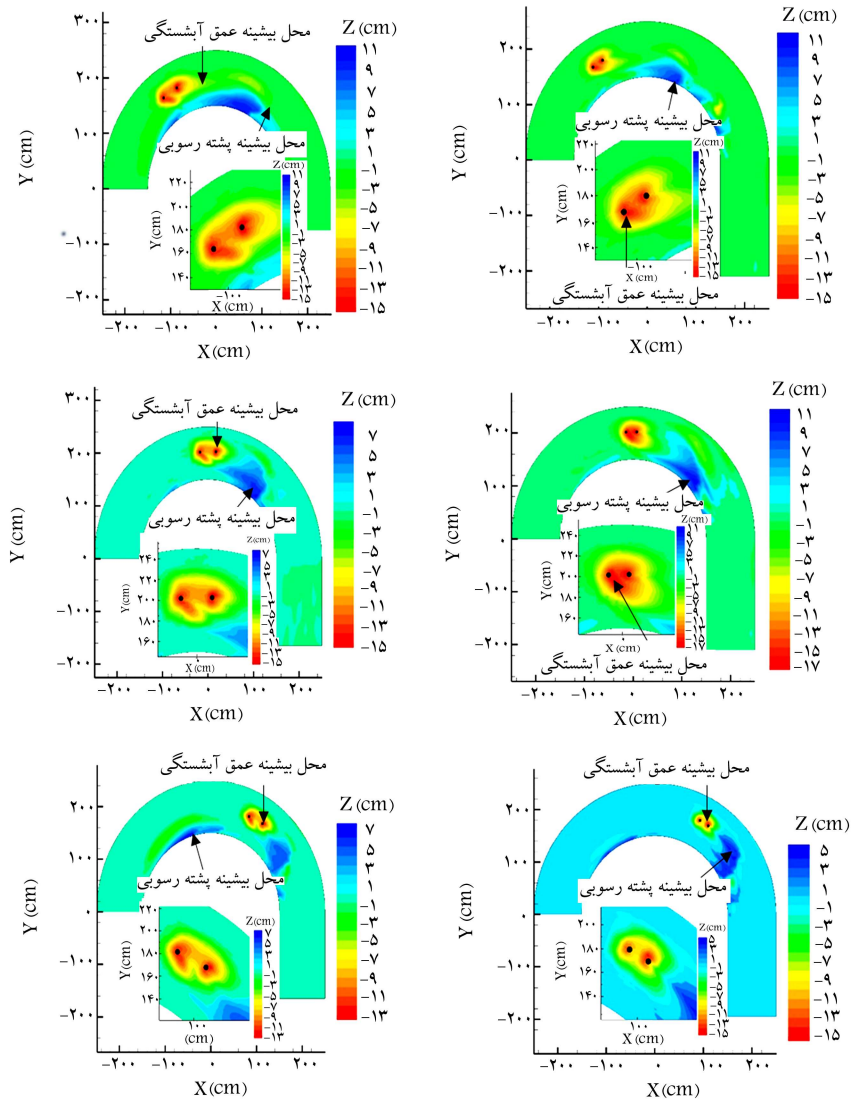
شکل ۵. توپوگرافی بستر به همراه بزرگ‌نمایی برای آزمایش بدون پایه.



شکل ۶. توپوگرافی بستر با تک‌پایه‌ی عمودی در زمان تعادل نسبی (I۹۰).

تعادل نسبی شروع به شکل‌گیری کرد. به‌طور کلی، بیشترین حرکت رسوبات بستر در موقعیت ۳۰ تا ۱۲۵ درجه و در نیمه‌ی داخلی قوس رخ داده است.

مشاهده‌های انجام شده‌ی برخی پژوهشگران^[۶،۵] نشان می‌دهد که بیشترین آب‌شستگی و یا تنش برشی بستر در حدود زاویه‌ی ۶۰ درجه در مسیر با قوس ۱۸۰ درجه رخ می‌دهد. در شکل ۶، توپوگرافی بستر در آزمایش آب‌شستگی با استقرار تک‌پایه‌ی عمودی در موقعیت ۹۰ درجه و با نام اختصاری I۹۰ نمایش داده شده است. هدف از آزمایش مذکور، مقایسه‌ی اثر تک‌پایه با زوج پایه‌های مورد استفاده است و در آن عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی برابر با ۹۳٪ عمق جریان در ابتدای قوس اندازه‌گیری شده است که در مقایسه با آزمایش زمان تعادل (T۱)، کاهش ۵ درصدی عمق چاله‌ی آب‌شستگی بیشینه مشاهده و صحت اندازه‌گیری زمان تعادل نسبی



الف (ب؛ ۷.۶۰؛ ج؛ ۷.۹۰؛ د؛ ۸.۹۰؛ ه؛ ۷.۱۲۰؛ و؛ ۸.۱۲۰).

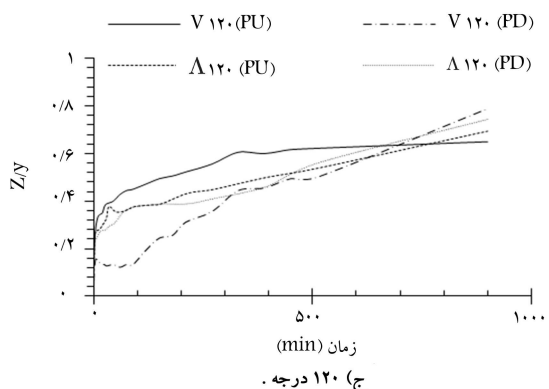
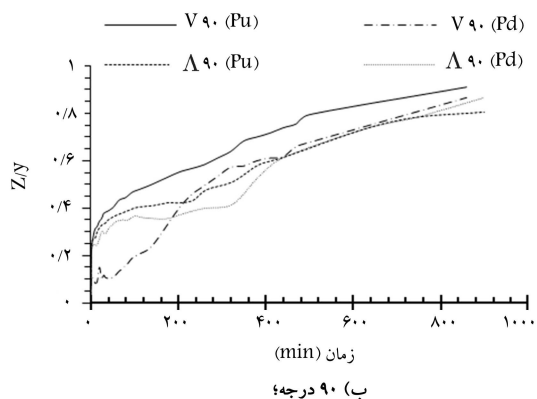
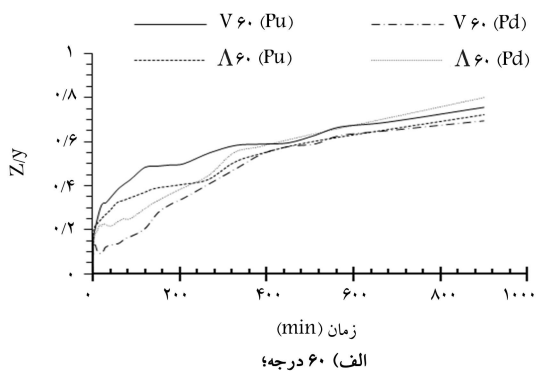
شکل ۷. توپوگرافی بستر به همراه بزرگ‌نمایی در آزمایش‌ها.

آن تا مرکز پایه‌ها به میزان ۲۴ برابر قطر پایه‌ها به طرف پایین دست پایه‌ها و در مجاورت دیواره‌ی داخلی قرار داشته است.

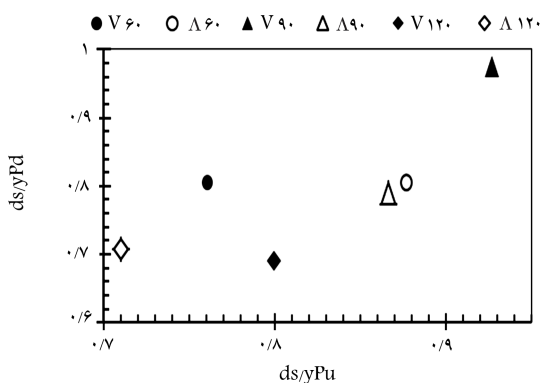
طبق مشاهدات آزمایشگاهی، تغییر مکان عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آبشستگی از مجاورت پایه‌ی بالادست به مجاورت پایه‌ی پایین دست در فاصله‌ی زمانی ۳۰ درصدی انتهای زمان تعادل نسبی رخ داده است. در آزمایش‌های جفت پایه‌ی V شکل و Λ شکل و مستقر در موقعیت ۱۲۰ درجه (7.120° و 8.120°) که توپوگرافی بستر آن در شکل‌های (ه) و (و) نمایش داده شده است، عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آبشستگی برای آزمایش‌های 7.120° و 8.120° به ترتیب به اندازه‌ی ۸۰ و ۷۳ درصد عمق جریان در ابتدای قوس اندازه‌گیری شده است. ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی در آزمایش 7.120° برابر ۲۶٪ عمق جریان در ابتدای قوس و در فاصله‌ی ۱۶ برابر قطر پایه‌ها به طرف پایین دست و با فاصله‌ی ۴۸ درصدی عرض کانال از جداره‌ی داخلی قرار داشته است. در آزمایش 8.120° ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی برابر ۳۸٪ عمق جریان در ابتدای قوس بود که فاصله‌ی آن تا مرکز پایه‌ها به اندازه‌ی ۳۰ برابر قطر پایه‌ها به طرف بالادست پایه‌ها و در مجاورت دیواره‌ی داخلی قرار داشت. تغییر

به سمت پایین دست و ۱۶٪ عرض کانال از دیواره‌ی داخلی به وقوع پیوست. طبق مشاهدات آزمایشگاهی نیز ذرات رسوبی خارج شده از چاله‌ی آبشستگی اطراف پایه‌ها تقریباً با زاویه‌ی ۲۵ درجه نسبت به خط مماس بر قوس به طرف دیواره‌ی داخلی حرکت می‌کنند که نتیجه‌ی آن، انباشت رسوبات در نزدیکی دیواره‌ی داخلی است.

در شکل (د) توپوگرافی بستر در آزمایش جفت پایه‌ی Λ شکل مستقر در موقعیت ۹۰ درجه نشان داده شده است (آزمایش 8.90°) که در آن عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آبشستگی برابر ۸۷٪ عمق جریان در ابتدای قوس بود و چاله‌ی مذکور در مجاورت پایه‌ی پایین دست قرار داشت. عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آبشستگی در آزمایش 8.90° نسبت به آزمایش V شکل و در همان موقعیت به میزان ۱۰٪ کاهش داشته است. همچنین موقعیت چاله‌ی آبشستگی با عمق بیشینه‌ی از مجاورت پایه‌ی بالادست به مجاورت پایه‌ی پایین دست انتقال یافته است. لازم به ذکر است که بیشینه‌ی ارتفاع پشته‌ی رسوبی برابر ۴۴٪ عمق جریان در ابتدای قوس بوده است که در مقایسه با حالت V شکل و در همان موقعیت به میزان ۱۴٪ کاهش و فاصله‌ی



شکل ۹. تغییرات عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی بی بعد شده نسبت به زمان برای موقعیت‌ها.

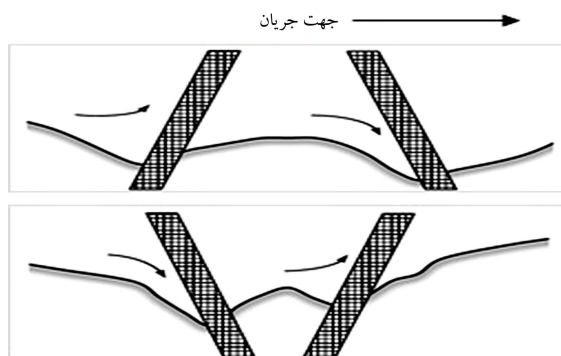


شکل ۱۰. بیشینه‌ی عمق چاله‌ی آب‌شستگی بی بعد شده با عمق جریان در ابتدای قوس در مجاورت پایه‌های بالادست و پایین دست.

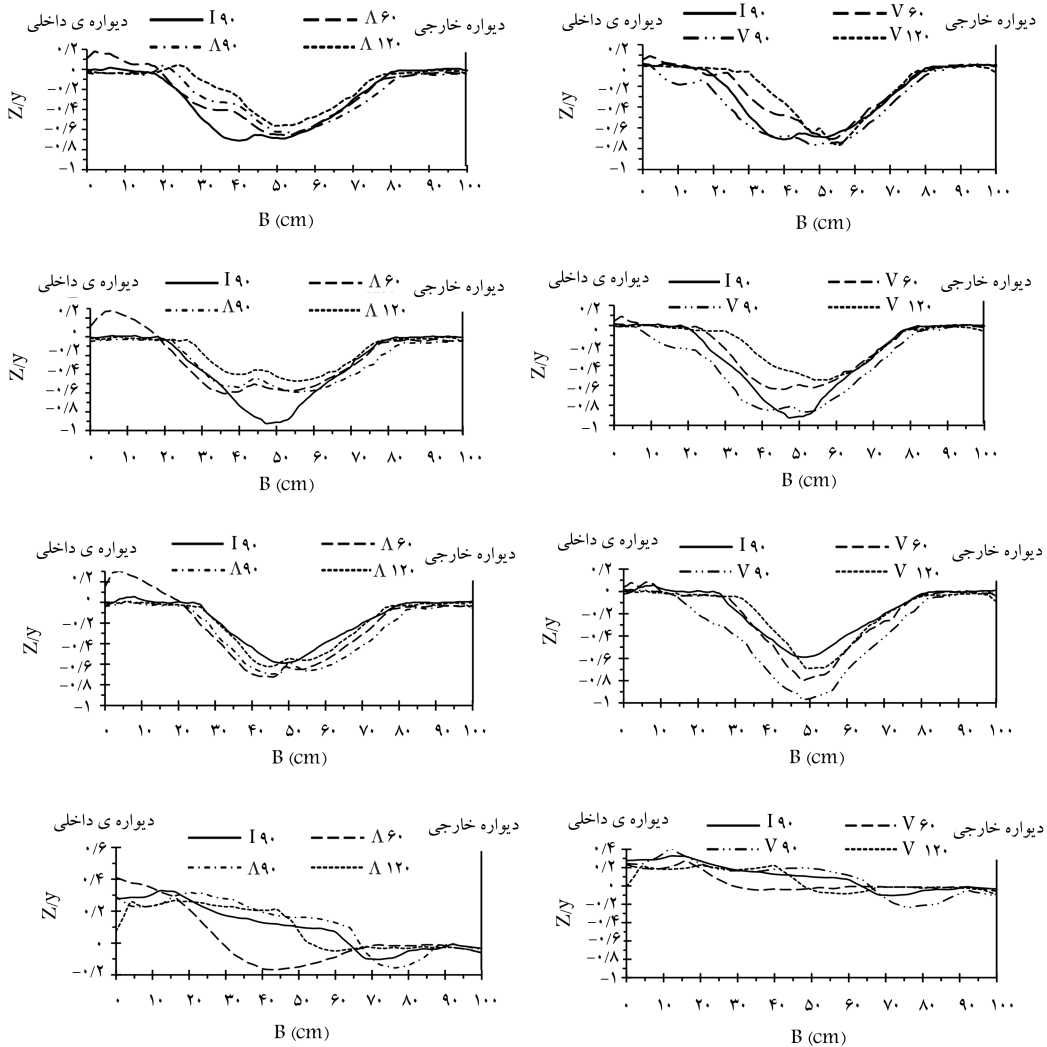
بیشینه‌ی عمق چاله‌ی آب‌شستگی از مجاورت پایه‌ی بالادست به مجاورت پایه‌ی پایین دست در حالت پایه‌های V شکل و مستقر در زاویه‌ی ۱۲۰ درجه با گذشت ۵۰٪ از زمان متعادل نسبی رخ داده و برای پایه‌های A شکل و مستقر در زاویه‌ی ۱۲۰ درجه نیز این اتفاق با گذشت ۵۷٪ از زمان تعادل نسبی مشاهده شده است. با توجه به مشاهدات انجام شده می‌توان نشان داد که شکل پایه در نحوه‌ی آب‌شستگی بسیار مؤثر است. پیش‌بینی می‌شود که در مجاورت پایه‌ی اول (پایه‌ی بالادست) آب‌شستگی بیشتر از پایه‌ی دوم رخ دهد. این امر در زوج پایه‌های عمودی امری متداول است و به دلیل نقش حفاظتی پایه‌ی اول، پایه‌ی دوم کمتر دچار آب‌شستگی می‌شود. ولی مشاهده می‌شود که با انحراف پایه به سمت پایین دست و یا بالادست، این روند تغییر چشم‌گیری دارد. در زوج پایه‌های A شکل، پایه‌ی اول به سمت پایین دست تمایل دارد و این امر باعث می‌شود که جریان پس از برخورد به پایه با سمت سطح آب برخورد کند. در صورتی که در پایه‌ی دوم، پایه به سمت بالادست متمایل است و جریان پس از برخورد به پایه به سمت بستر رانده می‌شود. این پدیده به صورت معکوس در زوج پایه‌ی V شکل رخ می‌دهد. با توجه به مطالب ذکر شده، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در زوج پایه‌ی A شکل در مجاورت پایه‌ی دوم و در زوج پایه‌ی V شکل در مجاورت پایه‌ی اول رخ می‌دهد (شکل ۸) که تنها استثناء با استقرار زوج پایه‌ی V شکل در موقعیت ۱۲۰ درجه است. در شرایط مذکور، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در مجاورت پایه‌ی دوم ایجاد می‌شود که احتمالاً به دلیل ترکیب جریان‌های ثانویه با جریان عبوری از بین پایه‌هاست.

در شکل ۹، تغییرات زمانی عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی در مجاورت هر پایه به صورت مجزا ارائه شده است، که در آن Pu بیانگر پایه‌ی بالادست (پایه‌ی اول) و Pd بیانگر پایه‌ی پایین دست است. در تمامی آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که در حدود ۱۵٪ ابتدای شروع آزمایش، نرخ آب‌شستگی در پایه‌ی دوم کمتر از پایه‌ی اول است که دلیل آن انتقال مصالح فرسایش یافته از چاله‌ی اول به چاله‌ی دوم است. با افزایش زمان آزمایش، مرز بین دو چاله‌ی اصلی کم‌رنگ‌تر می‌شود و فرسایش به‌طور مشترک در هر دو پایه رخ می‌دهد.

در شکل ۱۰، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی به صورت بی‌بعد شده با عمق جریان، در پایه‌های اول و دوم به صورت مجزا در محورهای افقی و عمودی ارائه شده و مشاهده می‌شود که مطابق آن بیشترین عمق آب‌شستگی با استقرار پایه‌ی V شکل در موقعیت ۹۰ درجه رخ داده است. در آزمایش مذکور، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در مجاورت هر دو پایه از تمامی آزمایش‌ها بیشتر است. در پایه‌ی A شکل با تغییر موقعیت پایه از ۶۰ درجه به ۹۰ و ۱۲۰ درجه، کاهش ۲ و ۲۰ درصدی عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در هر دو پایه‌ی اول و دوم مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که



شکل ۸. نمایش شماتیکی اثر زوج پایه‌ها در انحراف جریان.



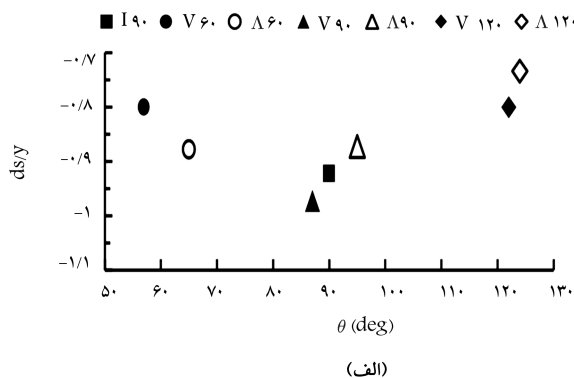
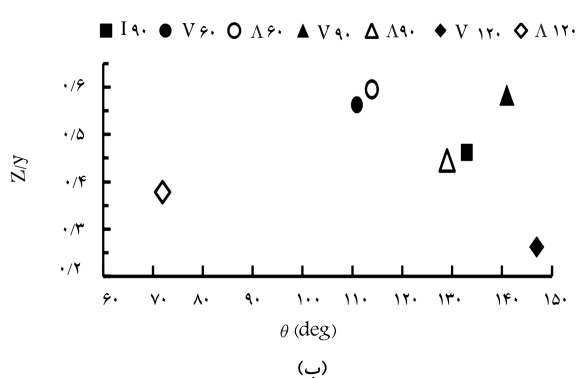
ه) دو برابر قطر پایه به سمت پایین دست پایه های V شکل؛
 و) دو برابر قطر پایه به سمت پایین دست پایه های Δ شکل؛
 ز) بیست برابر قطر پایه به سمت پایین دست پایه های V شکل؛
 ح) بیست برابر قطر پایه به سمت پایین دست پایه های Δ شکل.

الف) دو برابر قطر پایه به سمت بالا دست پایه های V شکل؛
 ب) دو برابر قطر پایه به سمت بالا دست پایه های Δ شکل؛
 ج) مرکز پایه های V شکل؛
 د) مرکز پایه های Δ شکل؛

شکل ۱۱. نمونه‌یی از مقاطع عرضی در فواصلی معادل ۲ برابر قطر پایه‌ها به سمت بالادست، مرکز پایه‌ها، ۲ برابر قطر پایه‌ها به سمت پایین دست و ۲ برابر قطر پایه‌ها به سمت پایین دست.

در زوج پایه‌ی V شکل، تغییر موقعیت رابطه‌ی مستقیمی با عمق آب‌شستگی ندارد. در شکل ۱۱، نمونه‌ی مقاطع عرضی نشان داده شده است، که در آن B بیانگر عرض کانال از ساحل داخلی، Z تراز بستر و Y عمق آب در مسیر مستقیم بالادست است. به منظور مقایسه‌ی بهتر، مقاطع عرضی به صورت فاصله از مرکز استقرار پایه دسته‌بندی شده‌اند. برای مثال در قسمت‌های الف و ب، فاصله‌ی معادل ۲ برابر قطر پایه به سمت بالادست پایه رس م شده است. این بدان معنی است که برای پایه با موقعیت استقرار ۶۰ درجه از ابتدای قوس، مقطع ذکر شده زاویه‌ی ۵۷ درجه را نشان می‌دهد و برای پایه‌ی نصب شده در زاویه‌ی ۹۰ درجه، زاویه‌ی ۸۷ درجه رسم شده است. بدین صورت تمامی مقاطع با یکدیگر قابل قیاس خواهند بود. در شکل (الف) و در فاصله‌ی معادل ۲ برابر قطر پایه به سمت بالادست

مشاهده می‌شود که در پایه‌های V شکل و در موقعیت استقرار ۱۲۰ درجه، ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی از دیگر حالات کوچک‌تر است، اما در پایه‌های V شکل در موقعیت استقرار ۹۰ درجه به دلیل اینکه پایه‌ها در رأس قوس قرار دارند و در معرض حمله‌ی جریان از مسیر مستقیم بالادست هستند، ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی بزرگ‌تر است. همان‌طور که در شکل (الف) مشخص است، در حالت Δ و در همان فاصله نیز پایه‌های مستقر در موقعیت ۱۲۰ درجه، ابعاد چاله‌ی کوچک‌تری دارند که دلیل آن تأثیر مسیر مستقیم پایین دست در کاهش نقش جریان‌های شکل گرفته در قوس تند است. همچنین در مقایسه‌ی پایه‌های Δ شکل و تک‌پایه در فاصله‌ی ذکر شده، چاله‌ی آب‌شستگی در حالت تک‌پایه گسترش بیشتری دارد. روند تغییرات ذکر شده در شکل‌های (الف) و (ب) و (ج) و (د) و در مقطع گذرنده از مرکز



شکل ۱۲. الف) تغییرات عمق بیشینه چاله آب‌شستگی بی بعد و ب) ارتفاع بیشینه پشته‌ی رسوبی بی بعد شده در برابر موقعیت.

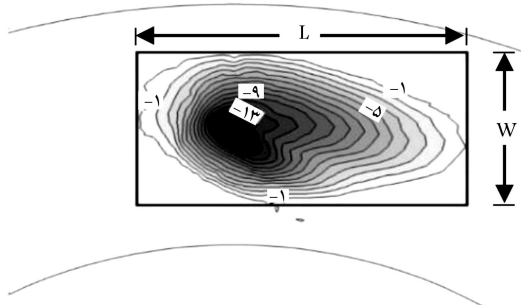
داخلی نشان داده شده است. در مقطع طولی با فاصله‌ی ۲٪ عرض کانال از ساحل داخلی همان‌طور که در شکل (۱۳ الف) مشاهده می‌شود، تقریباً هیچ‌گونه آب‌شستگی وجود ندارد و بیشینه‌ی ارتفاع پشته‌ی رسوبی در این مقطع متعلق به حالت ۸۶° در موقعیت ۱۱۴ درجه و به ارتفاع حدود ۵۵٪ عمق جریان در ابتدای قوس است. روند رسوب‌گذاری در مجاورت ساحل داخلی به صورت سبک‌وار تکرار می‌شود. برای توجیه دوره‌ی بودن روند رسوب‌گذاری و آب‌شستگی می‌توان گفت که مصالح فرسایش یافته در ابتدای تشکیل چاله‌ی آب‌شستگی، تشکیل پشته‌ی رسوبی می‌دهند. این پشته‌ی رسوبی باعث برهم زدن تعادل ناحیه‌ی مذکور می‌شود و در پایین‌دست این پشته‌ی رسوبی، گردآیدان منفی فشار ایجاد می‌شود که عامل کمکی در جهت فرسایش در پایین‌دست پشته‌ی رسوبی است. با فاصله گرفتن از این ناحیه، مجدداً پشته‌ی رسوبی تشکیل می‌شود. در صورت محدود نبودن آزمایش، این روند بدون توقف (البته با کاهش نرخ) ادامه خواهد داشت. در شکل (۱۳ ب) و در مقطع طولی معادل ۳۶٪ عرض کانال از ساحل داخلی، میزان آب‌شستگی عموماً در حالت ۸۱° بیشتر از ۷ است. در مقطع گذرنده از وسط کانال (شکل ۱۲ ج) و در موقعیت استقرار پایه‌ها در زاویه‌ی ۹۰ درجه، بیشترین میزان آب‌شستگی مشاهده می‌شود. در حالت استقرار در زاویه‌ی ۹۰ درجه و ۱۲۰ درجه بلافاصله پس از چاله‌ی آب‌شستگی، پشته‌ی رسوبی مشاهده می‌شود؛ در صورتی که این پدیده در موقعیت استقرار پایه‌ها در زاویه‌ی ۶۰ درجه و در وسط کانال مشاهده نمی‌شود. این روند در شکل (۱۳ د) و در مقطع طولی معادل ۶۴٪ عرض کانال از ساحل داخلی نیز مشاهده می‌شود. بررسی فرسایش در مجاورت ساحل خارجی امری است که در پیچان رودها، اهمیت ویژه‌ی دارد. بدین منظور در شکل ۱۳ و، مقطع طولی در فاصله‌ی معادل ۹۸٪ عرض کانال از ساحل داخلی یا به عبارتی در مجاورت ساحل خارجی رسم شده است. در آزمایش T۲ (قوس بدون استقرار پایه)، آب‌شستگی در مجاورت ساحل خارجی مشاهده نمی‌شود. این بدان معنی است که در قوس تند با شرایط جریان مذکور، فرسایش بستر در نزدیکی دیواره‌ی بیرونی قوس رخ نمی‌دهد. لازم به ذکر است که در رودخانه‌های قوسی شکل، فرسایش از دیواره‌ی خارجی شروع و به بستر کشیده می‌شود. در صورت تکرار آزمایش T۲ با دیواره‌ی غیرصلب، فرسایش ساحل خارجی و بستر مجاور آن مشاهده خواهد شد.

در ادامه، به بررسی مستطیل محیط بر چاله‌ی آب‌شستگی پرداخته شده است. این مستطیل با در نظر گرفتن نقاط آب‌شستگی با عمق بیش از ۱ سانتی‌متر (معادل ۵/۵٪ عمق جریان) مانند شکل ۱۴ و رسم مستطیل محیط بر آن به دست می‌آید. به‌طور تقریبی می‌توان گفت که مستطیل محیطی، پارامتری مناسب به‌منظور بیان

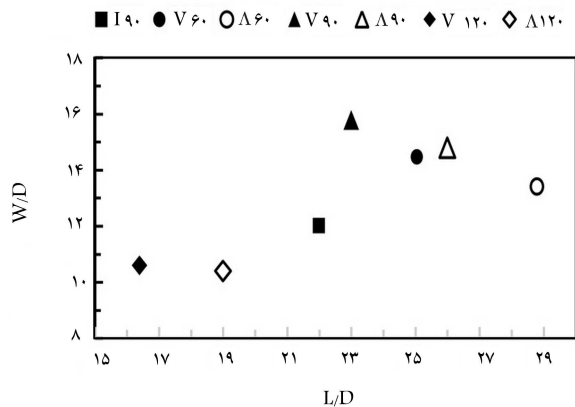
پایه‌ها نیز مشهود است. در فاصله‌ی معادل ۲ برابر قطر پایه‌ها به سمت پایین‌دست و در حالت ۷ (شکل ۱۱ ه)، کاهش عمق آب‌شستگی مشاهده می‌شود و پایه‌های مستقر در موقعیت ۹۰ درجه، بیشترین و حالت تک‌پایه، کمترین میزان آب‌شستگی را دارند. این روند در مورد پایه‌های ۸ شکل و در فاصله‌ی مذکور نیز مشاهده می‌شود (شکل ۱۰ و). مقایسه‌ی شکل‌های (۱۱ ب)، (۱۱ د) و (۱۱ و) بیانگر این است که در مجاورت ساحل داخلی و تا فاصله‌ی حدود ۲۰٪ عرض کانال از ساحل داخلی، در حالتی که پایه‌های ۸ شکل در موقعیت استقرار ۶۰ درجه قرار دارند، رسوب‌گذاری مشاهده می‌شود و ارتفاع رسوبات در پایین‌دست پایه بیشتر است. با توجه به اینکه در قوس فقط رسوب‌گذاری در ساحل داخلی و در موقعیت حدود ۶۰ درجه آغاز می‌شود، استقرار پایه‌ها تأثیر مضاعف در رسوب‌گذاری در ناحیه‌ی مذکور دارد. در فاصله‌ی معادل ۲ برابر قطر پایه‌ها به سمت پایین‌دست در هر دو حالت ۷ و ۸ شکل‌های (۱۱ ز) و (۱۱ ح)، آب‌شستگی در ساحل خارجی نیز مشهود است؛ ولی در پایه‌های ۸ شکل به‌طور کلی از پایه‌های ۷ شکل میزان آب‌شستگی بیشتر است، که دلیل آن هندسه‌ی پایه‌ها در حالت ۸ است که باعث تشدید جریان‌های رو به پایین می‌شود. همچنین در حالت ۸ و موقعیت استقرار پایه‌ها در زاویه‌ی ۶۰ درجه، میزان آب‌شستگی به‌خصوص در یک سوم میانی مقطع بیشتر است که بدین دلیل است که در فاصله‌ی ۲ برابر قطر پایه به سمت پایین‌دست در رأس قوس قرار می‌گیرد و در آنجا انحناهای شدید جریان و نیز وجود پشته‌ی رسوبی در بالادست و ریزش جریان از پشته‌ی رسوبی به کف، آب‌شستگی را افزایش می‌دهد.

در شکل (۱۲ الف)، عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی و موقعیت آن نشان داده شده است که در آن بیشترین عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آب‌شستگی مربوط به حالت ۷۹۰ است که در موقعیت ۸۷ درجه به وقوع پیوسته و کمترین مقدار در حالت ۸۱۲۰ و در موقعیت ۱۲۴ درجه واقع شده است. همچنین بیشینه‌ی عمق چاله‌ی آب‌شستگی با تغییر موقعیت پایه‌ها از ۹۰ درجه به ۶۰ و ۱۲۰ درجه برای حالت ۷ به اندازه‌ی ۱۷/۷٪ کاهش و این مقدار برای حالت ۸ نیز به ترتیب برابر ۰ و ۲۵ درصد کاهش یافته است. در شکل (۱۲ ب)، ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی و موقعیت آن قابل رؤیت است که مطابق آن بیشترین مقدار این پارامتر مربوط به حالت ۸۶۰ و در موقعیت ۱۱۴ درجه به وقوع پیوسته و کمترین مقدار این پارامتر مربوط به حالت ۷۱۲۰ و در موقعیت ۱۴۶ درجه واقع شده است. همچنین با تغییر شکل پایه از حالت ۷ به ۸ در موقعیت‌های ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب افزایش ۶ و ۳۲ درصدی در ارتفاع بیشینه‌ی پشته‌ی رسوبی مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۳، نمونه‌ی از چند مقطع طولی و در فواصل مختلف از ساحل



شکل ۱۴. راهنمای محاسبه‌ی مستطیل محیطی.



شکل ۱۵. ابعاد بی بعد شده‌ی مستطیل محیطی.

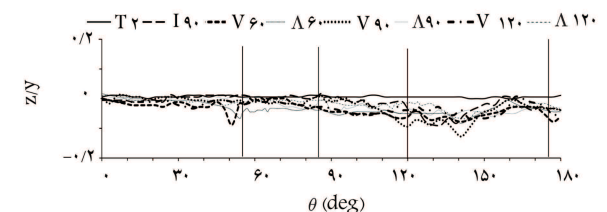
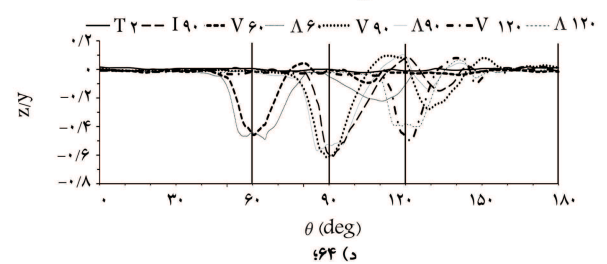
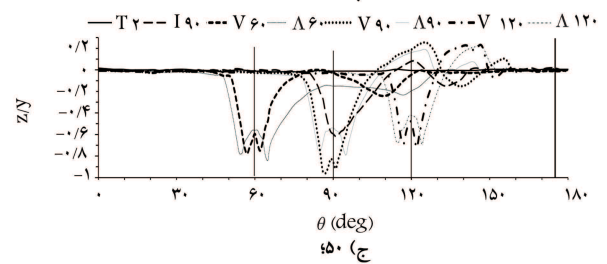
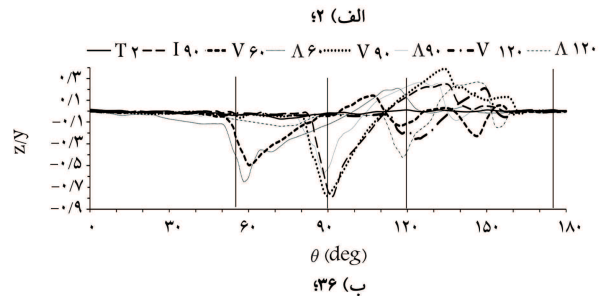
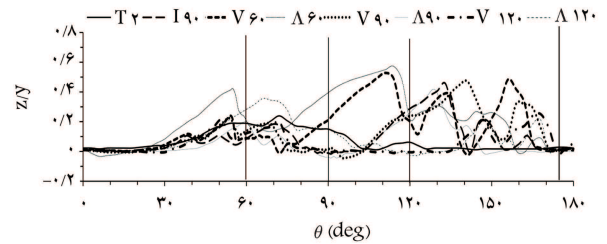
محیطی به میزان ۱۶٪ افزایش و عرض آن تغییر محسوسی نداشته است. به‌طور کلی با توجه به شکل ۱۵، عرض مستطیل محیطی چاله‌ی آب‌شستگی اصلی با پایه‌های V شکل ۵٪ بیشتر از پایه‌های A شکل است و همچنین طول مستطیل محیطی در حالت A در حدود ۱۲٪ بیشتر است که دلیل این امر به هندسه‌ی پایه‌های A شکل و تأثیر آن در جریان‌های عرضی است. در این نمودار بیشترین طول مستطیل محیطی مربوط به حالت ۸۶۰ و کمترین این مقدار مربوط به حالت ۷۱۲۰ است. بیشترین و کمترین مقدار عرض مستطیل محیطی به ترتیب مربوط به حالت ۷۹۰ و ۸۱۲۰ است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی الگوی آب‌شستگی پیرامون زوج پایه‌های هم‌گرا و واگرا (A شکل و V شکل) در قوس تند ۱۸۰ درجه پرداخته شده و این نتایج به‌دست آمده است:

-- شکل پایه، تأثیر به‌سزایی در تعیین موقعیت عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی دارد. عموماً در زوج پایه‌های V شکل پایه‌ی اول (پایه‌ی بالادست) بیشتر در معرض آب‌شستگی است؛ در حالی که در زوج پایه‌های A شکل، عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در مجاورت پایه‌ی دوم قرار دارد.

-- بیشینه‌ی عمق چاله‌ی آب‌شستگی در حالت ۷۹۰ و در مجاورت پایه‌ی بالادست آن رخ می‌دهد، که مقدار آن برابر ۹۷٪ عمق جریان در ابتدای قوس و کمینه‌ی



و) ۹۸ درصد عرض کانال از ساحل داخلی.

شکل ۱۳. نمونه‌بی از مقاطع طولی در فواصل مختلف.

ابعاد چاله‌ی آب‌شستگی اصلی است.

در شکل ۱۵، ابعاد بی‌بعد شده‌ی مستطیل محیطی بر چاله‌ی آب‌شستگی اصلی ترسیم شده است. در شکل مذکور، طول و عرض مستطیل محیطی به ترتیب با L و W نشان داده شده و D میانگین قطر پایه‌ی پل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در موقعیت استقرار پایه‌ها در زاویه‌ی ۶۰ درجه، با تغییر شکل پایه‌ها از حالت V به حالت A، طول مستطیل محیطی چاله‌ی آب‌شستگی اصلی به میزان تقریباً ۱۵٪ افزایش و عرض آن به میزان ۷٫۵٪ کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی حالت پایه‌های V شکل با A شکل، طول و عرض مستطیل محیطی بر چاله‌ی آب‌شستگی اطراف پایه‌های مستقر در موقعیت ۹۰ درجه به ترتیب به میزان ۱۳٪ افزایش و ۶٫۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین برای پایه‌های مستقر در موقعیت ۱۲۰ درجه، طول مستطیل

قطر پایه‌هاست و کمترین مقدار طول و عرض مستطیل محیطی نیز به ترتیب تقریباً $۱۶/۵$ و $۱۰/۵$ برابر قطر پایه‌هاست که مربوط به حالت‌های $V_{۱۲^\circ}$ و $\Lambda_{۱۲^\circ}$ هستند.

-- عرض چاله‌ی آب‌شستگی در زوج پایه‌های V شکل در حدود ۵% بیشتر از حالت Λ شکل است. این در حالی است که در این حالت طول مستطیل محیطی به‌طور متوسط ۱۲% کمتر است.

-- در مجاورت ساحل خارجی و در قوس بدون استقرار پایه، فرسایش رخ نمی‌دهد و استقرار پایه‌ها فقط باعث ایجاد آب‌شستگی در ناحیه‌ی مذکور هستند.

عمق چاله‌ی آب‌شستگی برابر ۷۳% عمق جریان در ابتدای قوس و مربوط به حالت $\Lambda_{۱۲^\circ}$ بوده است. همچنین بیشینه‌ی ارتفاع پشته‌ی رسوبی در موقعیت ۱۱۴° درجه و در مجاورت دیواره‌ی داخلی در حالت $\Lambda_{۶^\circ}$ رخ داده است که مقدار آن برابر ۶% عمق جریان در ابتدای قوس است.

-- با تغییر موقعیت پایه‌ها از ۹° درجه به ۶° و ۱۲° درجه برای حالت V شکل، بیشینه‌ی عمق چاله‌ی آب‌شستگی به ترتیب ۴ و ۵۵% کاهش یافته است.

-- بیشترین طول و عرض مستطیل محیطی بر چاله‌ی آب‌شستگی به ترتیب مربوط به حالت‌های $\Lambda_{۶^\circ}$ و $V_{۹^\circ}$ است، که مقدار آن‌ها به ترتیب تقریباً ۲۹ و ۲۳ برابر

پانوشتها

1. Chiew
2. Melville
3. Raudkivi
4. Ettema
5. Oliveto
6. Hager

منابع (References)

1. Dey, S., Bose, S.K. and Sastry, G.L.N. "Clear water scour at circular piers: A model", *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**(12), pp. 869-876 (1995).
2. Ettema, R., Mostafa, E.A., Melville, B.W. and Yassin, A.A. "Local scour at skewed piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **124**(7), pp. 756-759 (1998).
3. Melville, B.W. and Chiew, Y.-M. "Time scale for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **125**(1), pp. 59-65 (1999).
4. Bozkus, Z. and Yildiz, O. "Effects of inclination of bridge piers on scouring depth", *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**(8), pp. 827-832 (2004).
5. Emami, Y., Salamati, S.A. and Ghodsian, M. "Scour at cylindrical bridge pier in a 180 degree channel bend", *Paper presented at the 4th International Conference on Scour and Erosion*, Japan (2008).
6. Masjedi, A., Bejestan, M.S. and Kazemi, H. "Effects of bridge pier position in a 180 degree flume bend on scour hole depth", *Journal of Applied Sciences*, **10**(8), pp. 670-675 (2010).
7. Esmaili Varaki, M., Mosapour, S., and Hatamjafari, M., "The study of the effect of foundation on the maximum scour around the inclined bridge pier", *9th International Congress on Civil Engineering*, Esfahan University of Technology (In Persian) (2002).
8. Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Salimi, S. "Scour formation due to laterally inclined circular pier", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**(4), pp. 1311-1318 (2016).
9. Vaghefi, M., Akbari, M. and Fiouz, A.R. "An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: Secondary flow and bed shear stress", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**(4), pp. 1582-1593 (2016).
10. Chiew, Y.M. and Melville, B.W. "Local scour around bridge piers", *Journal of Hydraulic Research*, **25**(1), pp. 15-26 (1987).
11. Raudkivi, A.J. and Ettema, R. "Clear-water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**(3), pp. 338-350 (1983).
12. Oliveto, G. and Hager, W. "Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**(9), pp. 811-820 (2002).
13. Chiew, Y. "Mechanics of riprap failure at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**(9), pp. 635-643 (1995).
14. Melville, B. "Live-bed scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **110**(9), pp. 1234-1247 (1984).