

بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه انحراف گروه پایه بر آبستگي موضعی پیرامون پایه‌ها تحت شرایط جریان ماندگار

لیلا هاشمی*، سید محمود کاشفی پور، مهدی قمشی و محمد بهرامی یاراحمدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱)

چکیده

آبستگي موضعی پیرامون پایه‌های پل یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پل‌ها است. از این رو، بررسی عمق آبستگي پیرامون گروه پایه‌های پل امری ضروری است. در این پژوهش اثر زاویه انحراف گروه پایه تک‌ستونی در دو آرایش ۱×۲ و ۱×۳ نسبت به جهت جریان روی بیشینه عمق آبستگي پیرامون گروه پایه مورد بررسی قرار گرفت. گروه پایه در آرایش ۱×۲ در زوایای انحراف صفر تا ۹۰ درجه و در آرایش ۱×۳ در زوایای انحراف صفر تا ۴۵ درجه تحت شرایط جریان ماندگار قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش زاویه انحراف گروه پایه بر بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه اول تقریباً بی‌اثر است؛ اما تأثیر بسیاری بر بیشینه عمق آبستگي، توسعه زمانی آن و گسترش حفره آبستگي پیرامون پایه‌های دوم و سوم در آرایش‌های مختلف گروه پایه دارد. بیشینه عمق آبستگي گروه پایه در هر دو آرایش مختلف در زاویه انحراف ۳۰ درجه به وقوع پیوست که در آرایش ۱×۲ پیرامون پایه دوم و به میزان ۱۳/۳۳ درصد بیش از پایه اول و در آرایش ۱×۳ پیرامون پایه سوم و به میزان ۲۱/۵۷ درصد بیش از پایه اول دیده شد.

واژه‌های کلیدی: آبستگي موضعی، گروه پایه، زاویه انحراف، جریان ماندگار

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Leila-hashemi@stu.scu.ac.ir

مقدمه

یکی از مباحث مهم در مهندسی رودخانه، مطالعه اندرکنش سازه‌های تقاطعی نظیر پل‌ها با رودخانه است که پیامد آن وقوع آبشستگی در مجاورت این سازه‌ها است. آبشستگی اطراف پایه‌های پل یکی از دلایل عدم پایداری آن‌ها است و در صورت عدم اتخاذ راهکار مناسب، در نهایت منجر به تخریب سازه می‌شود. گروه پایه‌ها در عمل به طور گسترده برای پشتیبانی از سازه‌های هیدرولیکی و دریایی بکار می‌روند. مکانیزم آبشستگی پیرامون گروه پایه متناسب با آرایش و فاصله پایه‌ها از یکدیگر و همچنین زاویه انحراف گروه پایه نسبت به جهت جریان، متفاوت با تک پایه و پیچیده‌تر از آن است. این پیچیدگی به دلیل برهمکنش گردابه‌های پیرامون پایه‌های منفرد است (۱۱). هانا (۷) بیان کرد، الگوی جریان در گروه پایه شامل مکانیزم‌های حفاظتی، تقویتی، گردابه‌های جاری و فشردگی گرداب نعل اسبی است. پژوهش‌های انجام شده در زمینه آبشستگی موضعی گروه پایه در مقایسه با تک پایه به نسبت محدودتر است که دلیل این موضوع، مکانیزم پیچیده آبشستگی در گروه پایه است. پژوهش‌های محققانی چون هانا (۷)، نوح (۱۶) و نظریها (۱۵) را می‌توان از اولین مطالعات انجام شده در زمینه آبشستگی گروه پایه‌های پل دانست که یکی از مهم‌ترین پژوهش‌ها در این زمینه توسط هانا (۷) انجام شده است. ایشان آبشستگی گروه پایه با آرایش 1×2 را تحت زوایای انحراف مختلف صفر الی 90° درجه در جریان ماندگار مورد مطالعه قرار داد و مشاهده کرد که بیشینه عمق آبشستگی گروه پایه در زاویه 45° درجه و پیرامون پایه دوم رخ می‌دهد. ژائو و شپارد (۲۱) آبشستگی گروه پایه با آرایش 3×8 را در دو حالت پایه‌های استوانه‌ای و مربعی برای زوایای انحراف صفر الی 90° درجه مورد مطالعه قرار دادند. ایشان مشاهده کردند، بیشترین عمق آبشستگی برای پایه‌های دایره‌ای در زاویه 25° درجه و برای پایه‌های مربعی در زاویه 60° درجه رخ می‌دهد. عطایی آشتیانی و بهشتی (۲) به بررسی آبشستگی پیرامون گروه پایه در آرایش و فواصل نسبی مختلف پرداختند و یک ضریب تصحیح برای پیش‌بینی

بیشینه عمق آبشستگی ارائه کردند که تأثیر آرایش گروه پایه را در معادلات در نظر بگیرند. لانکا و همکاران (۱۰) عمق آبشستگی پیرامون گروه پایه با آرایش 1×4 را در زوایای انحراف مختلف با جریان و فواصل متفاوت پایه‌ها بررسی کردند. نتایج حاصل بیانگر کاهش اثر زاویه برخورد جریان بر عمق آبشستگی در نتیجه افزایش فاصله بین پایه‌ها در گروه پایه است. سلیمانی و همکاران (۲۰) با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی، تأثیر فاصله و آرایش مختلف گروه پایه بر عمق تعادلی و حفره آبشستگی را تحت شرایط ثابت آب زلال مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که آرایش پایه‌ها و فاصله آن‌ها بر مساحت و حجم حفره آبشستگی تأثیر می‌گذارد؛ به طوری که با افزایش فاصله پایه‌ها، علیرغم عمق آبشستگی، حجم و مساحت حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. ادیب و همکاران (۱) اثر قطر پایه، فاصله بین پایه‌ها، دبی جریان و اندازه ذرات رسوبی را بر آبشستگی گروه پایه استوانه‌ای با آرایش 1×3 مورد مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند که با افزایش فاصله پایه‌ها در فواصل نسبی بزرگتر از $2/2$ ، عمق آبشستگی پایه اول کاهش می‌یابد. ژو و همکاران (۲۲) آبشستگی پیرامون گروه پایه با آرایش 1×3 را در اندازه‌ها، فواصل و زوایای برخورد مختلف با جریان ماندگار مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که در شرایط قرارگیری گروه پایه در راستای جریان، بیشینه عمق آبشستگی همیشه پیرامون پایه اول اتفاق می‌افتد. با افزایش زاویه برخورد جریان، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد و محل رخداد آن بسته به فاصله بین پایه‌ها و زاویه برخورد جریان از پایه اول به پایه دوم و یا سوم منتقل می‌شود. اخروی و گوهری (۱۷) اثر افزایش عمق جریان (در شدت جریان مشابه) بر آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های تک ستونی متشکل از چهار ردیف پایه با فاصله متفاوت بین پایه‌ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش عمق جریان نه تنها عمق آبشستگی افزایش می‌یابد، بلکه وسعت عرضی گودال آبشستگی نیز افزایش زیادی پیدا می‌کند. پورقاسم زاده و قمشی (۱۸) اثر تغییر زاویه عرشه پل را در دو حالت

قرارگیری گروه پایه موازی با جهت جریان و زاویه دار نسبت جهت جریان مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که در هر دو حالت، بیشینه عمق آبستستگی گروه پایه با افزایش زاویه انحراف افزایش می یابد که میزان آن در حالت دوم بیش از حالت اول است.

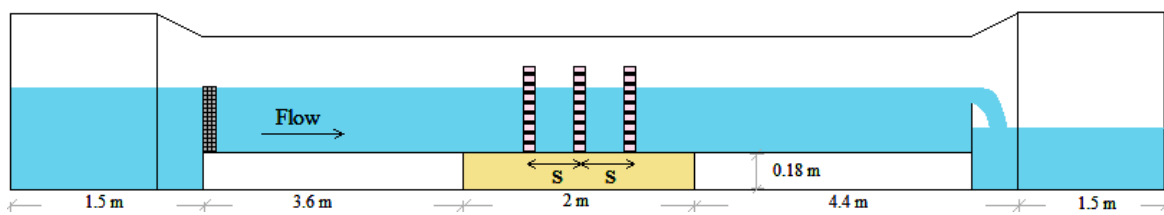
مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه بررسی عمق آبستستگی پیرامون گروه پایه نشان می دهد که بیشتر این مطالعات اثر فاصله بین پایه ها و آرایش گروه پایه را مورد بررسی قرار دادند و اثر زاویه برخورد جریان با گروه پایه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. انحراف گروه پایه بر تغییر الگوی جریان پیرامون پایه ها و آبستستگی ناشی از آن مؤثر است؛ بنابراین شناسایی و بررسی بحرانی ترین زاویه ای که پایداری گروه پایه را تهدید می کند، امری ضروری است. از این رو در این پژوهش اثر زاویه انحراف گروه پایه تک ستونی (با آرایش های 1×2 و 1×3) نسبت به جهت جریان روی آبستستگی موضعی پیرامون پایه ها بررسی شده است. در گروه پایه با آرایش 1×2 از زوایای انحراف صفر تا 90° درجه و در گروه پایه با آرایش 1×3 از زوایای انحراف صفر تا 45° درجه در شرایط جریان ماندگار و بستر آب زلال استفاده شد. در مطالعه حاضر به بررسی بیشینه عمق آبستستگی و محل وقوع آن و همچنین توسعه زمانی عمق آبستستگی پیرامون پایه ها در آرایش های مختلف پرداخته شد و نتایج آرایش های مختلف گروه پایه با یکدیگر و همچنین با تک پایه مقایسه شد.

مواد و روش ها

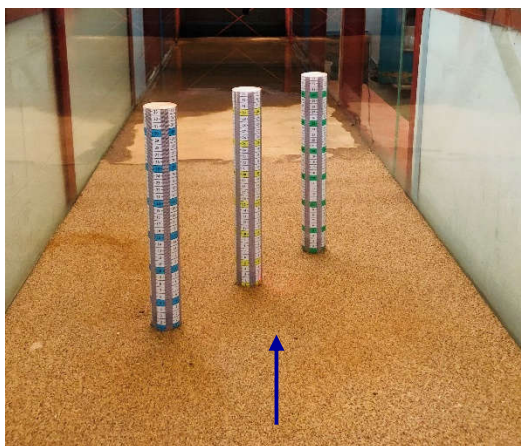
قرارداری گروه پایه موازی با جهت جریان و زاویه دار نسبت جهت جریان مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که در هر دو حالت، بیشینه عمق آبستستگی گروه پایه با افزایش زاویه انحراف افزایش می یابد که میزان آن در حالت دوم بیش از حالت اول است.

مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه بررسی عمق آبستستگی پیرامون گروه پایه نشان می دهد که بیشتر این مطالعات اثر فاصله بین پایه ها و آرایش گروه پایه را مورد بررسی قرار دادند و اثر زاویه برخورد جریان با گروه پایه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. انحراف گروه پایه بر تغییر الگوی جریان پیرامون پایه ها و آبستستگی ناشی از آن مؤثر است؛ بنابراین شناسایی و بررسی بحرانی ترین زاویه ای که پایداری گروه پایه را تهدید می کند، امری ضروری است. از این رو در این پژوهش اثر زاویه انحراف گروه پایه تک ستونی (با آرایش های 1×2 و 1×3) نسبت به جهت جریان روی آبستستگی موضعی پیرامون پایه ها بررسی شده است. در گروه پایه با آرایش 1×2 از زوایای انحراف صفر تا 90° درجه و در گروه پایه با آرایش 1×3 از زوایای انحراف صفر تا 45° درجه در شرایط جریان ماندگار و بستر آب زلال استفاده شد. در مطالعه حاضر به بررسی بیشینه عمق آبستستگی و محل وقوع آن و همچنین توسعه زمانی عمق آبستستگی پیرامون پایه ها در آرایش های مختلف پرداخته شد و نتایج آرایش های مختلف گروه پایه با یکدیگر و همچنین با تک پایه مقایسه شد.

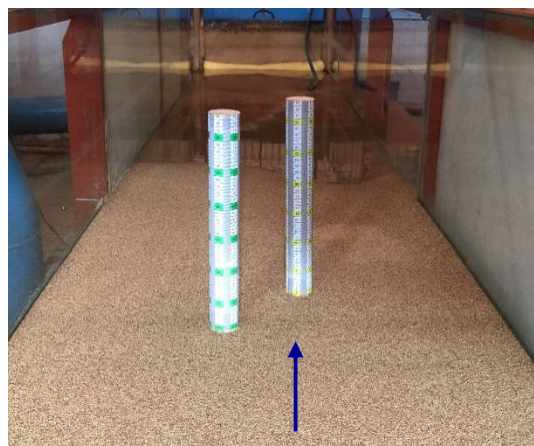
آزمایش های پژوهش حاضر در فلومی به طول 10 متر، عرض 0.74 متر و عمق 0.6 متر با دیواره های شیشه ای در آزمایشگاه مدل های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز صورت پذیرفت. عمق جریان در فلوم توسط سرریز انتهایی آن تنظیم و کنترل می شد و دبی جریان ورودی به فلوم با استفاده از یک دبی سنج الکترومغناطیس (مگاب 3000 با دقت



(الف)

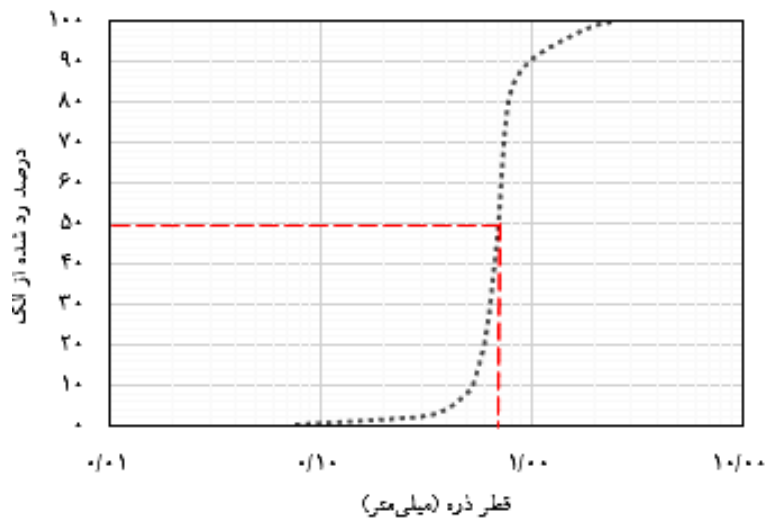


(ج)



(ب)

شکل ۱. الف) تصویر شماتیک فلوم مورد استفاده در این پژوهش، ب) گروه پایه با آرایش ۱×۲، ج) گروه پایه با آرایش ۱×۳



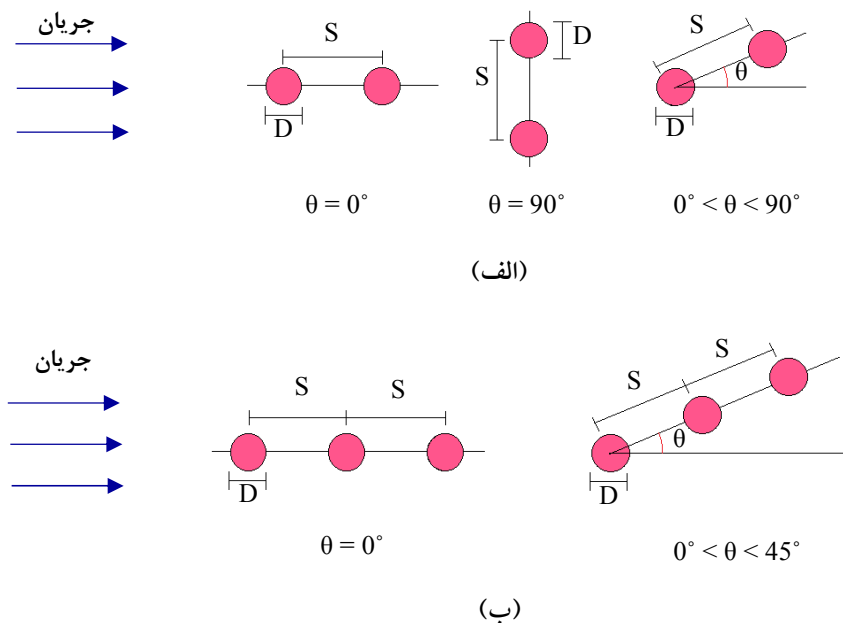
شکل ۲. منحنی دانه بندی رسوبات بستر

پایه باشد، گروه پایه مانند تک پایه بزرگ عمل می کند و اگر فواصل بین دو پایه بزرگ تر از ۶ برابر قطر پایه شود، اثر متقابل پایه ها بر یکدیگر از بین می رود (۱۱)؛ بنابراین در این پژوهش،

مشخصات آن ها در جدول ۱ ارائه شده است. تصویر شماتیک چیدمان گروه پایه با آرایش مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. در صورتی که فواصل بین دو پایه کوچکتر از ۳ برابر قطر

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌های انجام شده

ردیف	آرایش گروه پایه	تعداد پایه‌ها	زاویه انحراف گروه پایه (θ)	V/V_c	فرد جریان
۱	تک پایه	۱	—	۰/۹۳	۰/۲۴
۲	۱×۲	۲	۰	۰/۹۳	۰/۲۴
۳	۱×۲	۲	۱۵	۰/۹۳	۰/۲۴
۴	۱×۲	۲	۳۰	۰/۹۳	۰/۲۴
۵	۱×۲	۲	۴۵	۰/۹۳	۰/۲۴
۶	۱×۲	۲	۶۰	۰/۹۳	۰/۲۴
۷	۱×۲	۲	۷۵	۰/۹۳	۰/۲۴
۸	۲×۱	۲	۹۰	۰/۹۳	۰/۲۴
۹	۱×۳	۳	۰	۰/۹۳	۰/۲۴
۱۰	۱×۳	۳	۱۵	۰/۹۳	۰/۲۴
۱۱	۱×۳	۳	۳۰	۰/۹۳	۰/۲۴
۱۲	۱×۳	۳	۴۵	۰/۹۳	۰/۲۴



شکل ۳. شماتیک قرارگیری گروه پایه با آرایش‌های مختلف نسبت به جهت جریان، الف) گروه پایه با آرایش ۱×۲،

ب) گروه پایه با آرایش ۱×۳

پذیرفت. عمق آبشستگی در یک ساعت اول به سرعت افزایش یافت و پس از آن روند کاهشی در پیش گرفت و از ساعت دهم به بعد تغییری در روند عمق آبشستگی مشاهده نشد؛ بنابراین زمان تعادل آبشستگی در آزمایش‌ها این پژوهش ۱۰ ساعت در نظر گرفته شد.

روش انجام آزمایش‌ها

قبل از شروع هر آزمایش، بستر رسوبی فلوم به دقت تسطیح می‌شد. پس از آن سرریز کشویی انتهایی فلوم بالا آورده می‌شد. با باز کردن تدریجی شیر پروانه‌ای موجود در لوله ورودی به فلوم، جریان با دبی اندک و به تدریج وارد فلوم می‌شد؛ به گونه‌ای که قبل از آغاز آزمایش هیچ‌گونه آبشستگی پیرامون پایه‌ها صورت نگیرد. پس از بالا آمدن سطح آب درون فلوم و اطمینان از اشباع شدن کامل رسوبات، دبی به تدریج تا رسیدن به مقدار مدنظر توسط شیر پروانه‌ای افزایش می‌یافت و از سوی دیگر عمق جریان توسط سرریز انتهایی برای آغاز آزمایش تنظیم می‌شد. پس از تنظیم دبی و عمق جریان، آزمایش آغاز می‌شد. با گذشت مدت زمان ۱۰ ساعت از شروع آزمایش، پمپ خاموش و جریان ورودی به فلوم با بستن شیر پروانه‌ای قطع می‌شد. آب موجود درون فلوم از طریق شیرهای زهکشی نصب شده در زیر بخش رسوبی به تدریج تخلیه می‌شد تا تغییری در توپوگرافی بستر ایجاد نکند. پس از زهکشی کامل بستر، توپوگرافی بستر پیرامون پایه‌ها توسط دستگاه برداشت پروفیل بستر اندازه‌گیری شد. این دستگاه مجهز به یک سنسور لیزری (با دقت کمتر از ۰/۵ میلی‌متر) بود و از طریق یک نرم‌افزار رابط توسط رایانه اجرا می‌شد. داده‌های برداشت‌شده توسط دستگاه، در قالب فایل اکسل به کامپیوتر منتقل می‌شدند.

نتایج و بحث

بررسی بیشینه عمق آبشستگی پیرامون گروه پایه

در این پژوهش بیشینه عمق آبشستگی گروه پایه در زوایای انحراف مختلف با راستای جریان ماندگار در دو آرایش مختلف

فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها در آرایش دوتایی و سه‌تایی ۴ برابر قطر پایه ($S/D=4$) در نظر گرفته شد. به منظور حذف تأثیر دیواره‌های کانال بر عمق آبشستگی، نسبت عرض کانال به عرض پایه باید بزرگتر از ۶/۲۵ باشد (۱۹). در این پژوهش این نسبت در حالت قرارگیری گروه پایه هم‌جهت با جریان (زاویه صفر درجه)، برابر با ۱۶/۴۴ و در حالت قرارگیری گروه پایه عمود بر مسیر جریان (زاویه انحراف ۹۰ درجه)، برابر با ۸/۲۲ است.

آزمایش‌های این پژوهش در شرایط آب زلال و برای V/V_c برابر ۰/۹۳ انجام شد. V سرعت متوسط جریان بالادست و V_c سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات رسوبی است. به منظور تعیین آزمایشگاهی سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر، آزمایش‌هایی بدون حضور پایه با تنظیم دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه و عمق‌های مختلف جریان برای مشاهده حرکت یا عدم حرکت رسوبات بستر انجام شد. پس از بررسی‌های انجام شده، در نهایت عمق ثابت ۲۰/۳ سانتی‌متر برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. برای صحت سنجی شرایط آستانه حرکت مشاهداتی، پارامتر V_c بر اساس رابطه نیل (۱۳) محاسبه شد و نتیجه به دست آمده تطابق مناسبی را با مشاهده آزمایشگاهی نشان داد. طبق توصیه چیو و ملویل (۵) اگر نسبت عمق جریان به قطر پایه بیش از ۳/۵ باشد، عمق جریان بر آبشستگی بی اثر است. در این پژوهش این نسبت برابر با ۴/۵ است.

برخی از پژوهشگران بر این باورند که زمان ایجاد عمق آبشستگی تعادلی ممکن است بی‌نهایت یا نامحدود باشد؛ زیرا عمق آبشستگی تعادلی آب زلال با گذشت زمان به صورت مجانبی به دست می‌آید (۱۲). امینی و اقبال زاده (۴) اظهار داشتند که ۷۸ الی ۹۸ درصد از عمق تعادلی آبشستگی در ۸ ساعت ابتدایی آزمایش رخ می‌دهد. معمار و همکاران (۱۴) بیان کردند که حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد عمق تعادلی آبشستگی در ۶ ساعت اول رخ می‌دهد. براین اساس برای تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها، آزمایشی به مدت ۱۲ ساعت صورت

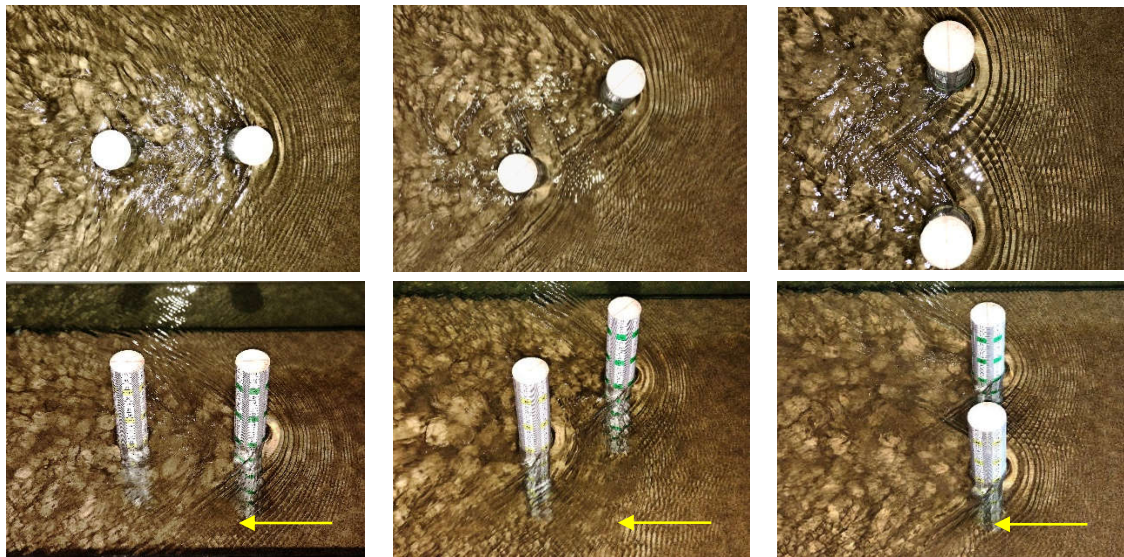
افزایش زاویه انحراف گروه پایه تا حدودی ثابت است که نشان می‌دهد، اثر مکانیزم تقویتی در زوایای انحراف کوچک تقریباً برابر با اثر مکانیزم فشردگی گردابه‌های نعل‌اسبی در زوایای انحراف بزرگتر است.

همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد، با افزایش زاویه انحراف گروه پایه، میزان بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه اول تا حدودی ثابت بوده و تغییر محسوسی دیده نمی‌شود، بنابراین می‌توان گفت که اثر زاویه انحراف بر بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه اول تقریباً ناچیز است. محاسبات نشان داد، میانگین تغییرات بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه اول در زوایای مختلف نسبت به صفر درجه در هر دو آرایش 1×2 و 1×3 کمتر از ۱ درصد است. این مقدار در مطالعه هانا (۷) برای گروه پایه دوتایی کمتر از ۵ درصد بیان شده است. بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه‌های دوم و سوم برخلاف پایه اول، متاثر از زاویه انحراف گروه پایه است؛ به گونه‌ای که با افزایش زاویه انحراف تا 30° درجه، مقدار آن افزایش می‌یابد و بعد از آن روند کاهشی در پیش می‌گیرد. دلیل این موضوع را می‌توان تغییر موقعیت قرارگیری پایه پایین دست نسبت به مسیر جریان با افزایش زاویه انحراف گروه پایه دانست که بر شدت مکانیزم گردابه‌های جاری پیرامون پایه‌های پایین دست تأثیرگذار است. گردابه‌های جاری از پایه بالادست همراه با جریان به پایین دست منتقل می‌شوند و ممکن است با پایه‌های پایین دست برخورد داشته باشند. در چنین شرایطی برهمکنش گردابه‌ها ظرفیت انتقال رسوب پیرامون پایه را افزایش می‌دهد (۱۱).

مقایسه عمق آبشستگی پایه‌های اول و دوم گروه پایه 1×2 در شکل ۵-الف نشان می‌دهد، در حالت قرارگیری گروه پایه در راستای جریان (زاویه صفر درجه)، عمق آبشستگی پایه دوم کمتر از پایه اول و تک پایه است و بیشینه عمق آبشستگی گروه پایه همواره در پایه اول رخ می‌دهد. نتیجه مشابهی در مطالعات عطایی آشتیانی و بهشتی (۲)، امینی و اقبال زاده (۴) و کشاورزی و همکاران (۸) گزارش شده است. در حالت قرارگیری گروه پایه در زاویه صفر درجه، پایه اول به‌عنوان مانع

1×2 و 1×3 تحت شرایط بستر آب زلال بررسی و ارزیابی شد. هنگامی که گروه پایه نسبت به راستای جریان منحرف می‌شود و تحت زاویه با جریان قرار می‌گیرد، الگوی جریان پیرامون هر پایه بسته به موقعیت قرارگیری آن نسبت به سایر پایه‌ها و شرایط جریان برخوردی به پایه تغییر می‌کند. با تغییر الگوی جریان، شدت و اثرگذاری مکانیزم‌های مؤثر بر آبشستگی، گروه پایه دستخوش تغییرات بسیاری می‌شود. چگونگی برخورد جریان به پایه‌ها در زوایای انحراف مختلف گروه پایه در آرایش 1×2 در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ۵ تغییرات بیشینه عمق آبشستگی پایه‌های گروه پایه در دو آرایش 1×2 و 1×3 را به ازای زوایای انحراف مختلف نشان می‌دهد. میزان بیشینه عمق آبشستگی در آزمایش متناظر تک پایه نیز در این شکل به صورت خط چین قرمز رنگ نمایش داده شده است. محور افقی این شکل نشان‌دهنده زاویه انحراف گروه پایه و محور قائم آن نشان‌دهنده نسبت بی‌بعد بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه به قطر پایه است. با توجه به شکل ۵، بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه اول در همه زوایای انحراف گروه پایه در هر دو آرایش 1×2 و 1×3 بیش از تک پایه است. ساختار جریان و تعامل آن با بستر رسوبی در گروه پایه بسیار پیچیده‌تر از تک پایه است. دلیل این امر برهمکنش گردابه‌های پیرامون هر پایه با پایه کناری است. با قرارگیری پایه دوم در پشت پایه اول و همپوشانی حفره‌های آبشستگی پیرامون پایه‌ها، شیب پایین دست حفره آبشستگی پایه اول کاهش یافته و انتقال ذرات رسوبی به خارج از آن راحتتر صورت می‌گیرد. این مسئله که به‌عنوان مکانیزم تقویتی معرفی می‌شود، عامل افزایش عمق آبشستگی در پایه اول گروه پایه نسبت به تک پایه در زوایای انحراف کم است. در زوایای انحراف بزرگتر، اثر مکانیزم فشردگی گردابه‌های نعل‌اسبی را می‌توان دید. در این حالت بازوهای فشرده گرداب نعل‌اسبی منجر به افزایش سرعت موضعی جریان شده و بر عمق آبشستگی تأثیر می‌گذارند. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، اختلاف عمق آبشستگی پایه اول و تک پایه با

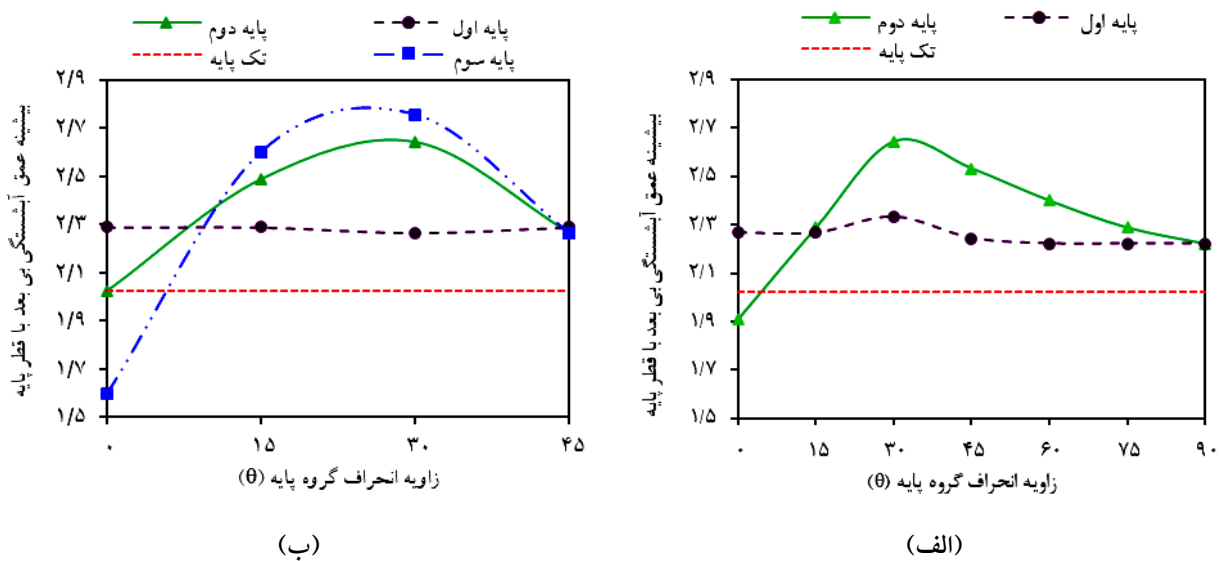


الف) زاویه ۹۰ درجه

ب) زاویه ۳۰ درجه

الف) زاویه صفر درجه

شکل ۴. برخورد جریان به پایه‌ها در زوایای انحراف مختلف گروه پایه با آرایش ۱×۲



شکل ۵. تغییرات بیشینه عمق آبهستگی بدون بعد پیرامون پایه‌های گروه پایه الف) آرایش ۱×۲ و ب) آرایش ۱×۳

کاهش سرعت جریان منجر به کاهش قدرت گردابه‌های پیرامون پایه شده و به دنبال آن عمق آبهستگی پیرامون پایه پایین دست کاهش می‌یابد. علاوه بر این رسوبات ته‌نشین شده در پشت پایه بالادست به درون حفره پایه پایین دست ریزش کرده و مانع از افزایش عمق آبهستگی می‌شود. این دو عامل

برای پایه پایین دست عمل کرده و منجر به کاهش سرعت جریان برخوردی به پایه پایین دستی می‌شود. عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۳) با بررسی ساختار سه بعدی جریان در گروه پایه دوتایی بیان کردند، سرعت جریان برخوردی به پایه دوم حدود ۰/۲ الی ۰/۳ سرعت متوسط جریان بالادست است.

بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه اول رخ می‌دهد و برای پایه‌های بعدی مقدار آن پیوسته کاهش می‌یابد. این نتیجه با یافته‌های ژو و همکاران (۲۲) مطابقت دارد. در این حالت عمق آبستگي پیرامون پایه دوم به دلیل اثر تقویتی پایه سوم، برابر با عمق آبستگي تک‌پایه و بیش از عمق آبستگي پایه دوم در آرایش ۱×۲ گروه پایه در شرایط مشابه است. از طرفی بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه سوم به دلیل اثر حفاظتی پایه‌های بالادست کمتر از عمق آبستگي تک‌پایه است. محاسبات نشان داد که بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه اول گروه پایه در آرایش ۱×۳ به ترتیب ۱۳/۲ و ۴۳ درصد بیش از پایه‌های دوم و سوم است.

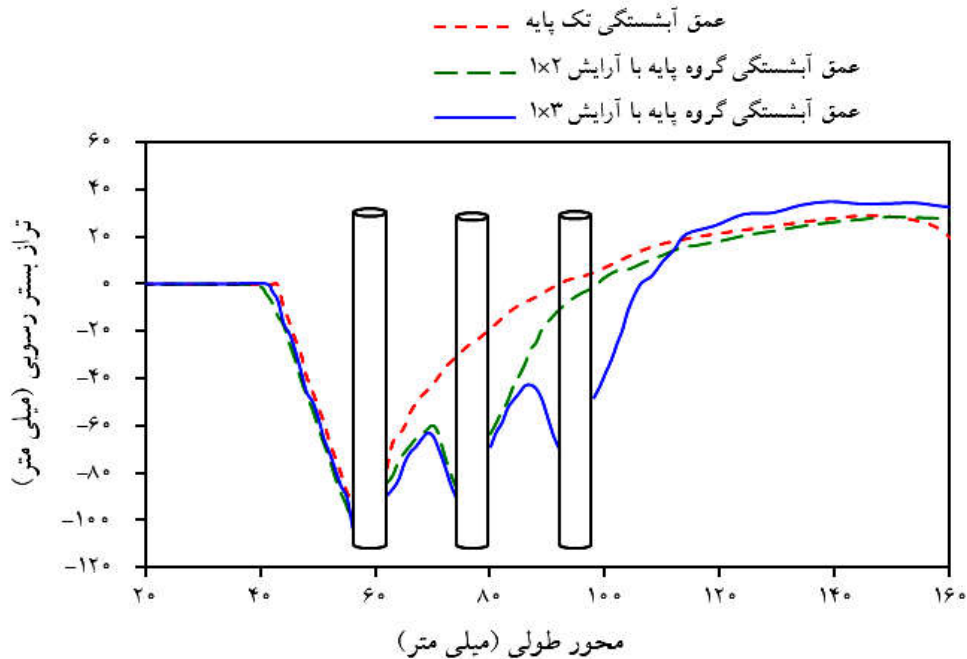
در زوایای انحراف ۱۵ و ۳۰ درجه، بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه‌های دوم و سوم افزایش می‌یابد و بیش از پایه اول می‌شود (شکل ۵-ب). با افزایش زاویه انحراف گروه پایه ضمن اینکه اثر حفاظتی پایه اول بر پایه‌های پسین کاهش می‌یابد، پایه سوم در معرض گردابه‌های جاری از پایه‌های پیشین خود قرار می‌گیرد؛ بنابراین بیشینه عمق آبستگي پیرامون آن افزایش یافته و بیش از پایه‌های دوم و اول می‌شود. در نتیجه در زوایای انحراف ۱۵ و ۳۰ درجه، بیشینه عمق آبستگي گروه پایه پیرامون پایه سوم به وقوع پیوست. محاسبات نشان داد، بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه سوم در زاویه ۱۵ درجه به ترتیب ۴/۴۶ و ۱۳/۵۹ درصد و در زاویه ۳۰ درجه به ترتیب ۴/۲ و ۲۱/۵۷ درصد بیش از پایه‌های دوم و اول است.

مقایسه مقادیر عمق آبستگي پایه دوم گروه پایه در دو آرایش ۱×۲ و ۱×۳ در زوایای انحراف ۱۵ و ۳۰ درجه نشان داد که در زاویه انحراف ۱۵ درجه، بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه دوم گروه پایه با آرایش ۱×۳ بیش از پایه متناظر آن در آرایش ۱×۲ است که نشان می‌دهد اثر تقویتی پایه سوم روی پایه دوم در زاویه انحراف ۱۵ درجه نیز برقرار است. این مقادیر در زاویه انحراف ۳۰ درجه برای هر دو آرایش گروه پایه با هم برابر بوده و به نظر می‌رسد که در این زاویه اثر تقویتی پایه سوم بر پایه دوم از بین رفته است. در زاویه انحراف ۴۵ درجه هر کدام از پایه‌ها به طور مستقل در مقابل جریان قرار می‌گیرند و

به‌عنوان مکانیزم حفاظتی در آبستگي گروه پایه بیان می‌شوند (۷). شکل ۶ اثر حفاظت پایه اول بر کاهش بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه‌های دوم و سوم را بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش به‌خوبی نشان می‌دهد. محاسبات نشان داد، بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه دوم در آرایش ۱×۲ حدود ۱۶ درصد کمتر از پایه اول است. این مقدار در مطالعات هانا (۷) و امینی و اقبال زاده (۴) به ترتیب حدود ۲۰ و ۳۰ درصد گزارش شده است.

در زاویه انحراف ۱۵ درجه، بیشینه عمق آبستگي پایه دوم به دلیل قرارگیری در مقابل جریان و کاهش اثر حفاظتی پایه اول افزایش می‌یابد و برابر با عمق آبستگي پایه اول می‌شود (شکل ۵-الف). روند افزایش بیشینه عمق آبستگي با افزایش زاویه تا ۳۰ درجه ادامه می‌یابد؛ به‌طوری که در زاویه انحراف ۳۰ درجه به دلیل اثر مکانیزم گردابه‌های جاری، بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه دوم از پایه اول پیشی می‌گیرد و بیشینه عمق آبستگي گروه پایه پیرامون پایه دوم رخ می‌دهد. در این شرایط بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه دوم ۱۳/۳۳ درصد بیش از پایه اول است. در زوایای انحراف بزرگتر اثر مکانیزم گردابه‌های جاری کاهش یافته و بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه دوم کاهش می‌یابد، اما همواره بیش از عمق آبستگي پایه اول است. در زاویه ۷۵ درجه بیشینه عمق آبستگي پیرامون دو پایه تا حدودی به هم نزدیک می‌شود و در زاویه ۹۰ درجه (دو پایه عمود بر راستای جریان) با هم برابر می‌شوند. به دلیل اثر فشردگی گردابه‌های نعل اسبی در زوایای ۷۵ و ۹۰ درجه، عمق آبستگي پیرامون هر پایه بیش از عمق آبستگي تک‌پایه در شرایط مشابه است. بیشینه عمق آبستگي پیرامون پایه دوم در زوایای انحراف ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه به ترتیب ۱۲/۸۷، ۸ و ۳ درصد بیش از پایه اول است.

مقایسه عمق آبستگي پایه‌های اول، دوم و سوم در آرایش ۱×۳ گروه پایه مطابق شکل ۵-ب نشان می‌دهد که روند تغییرات عمق آبستگي موضعی پیرامون پایه‌ها در حالت قرارگیری گروه پایه در زاویه صفر درجه مشابه با آرایش ۱×۲ گروه پایه است؛ به‌طوری که

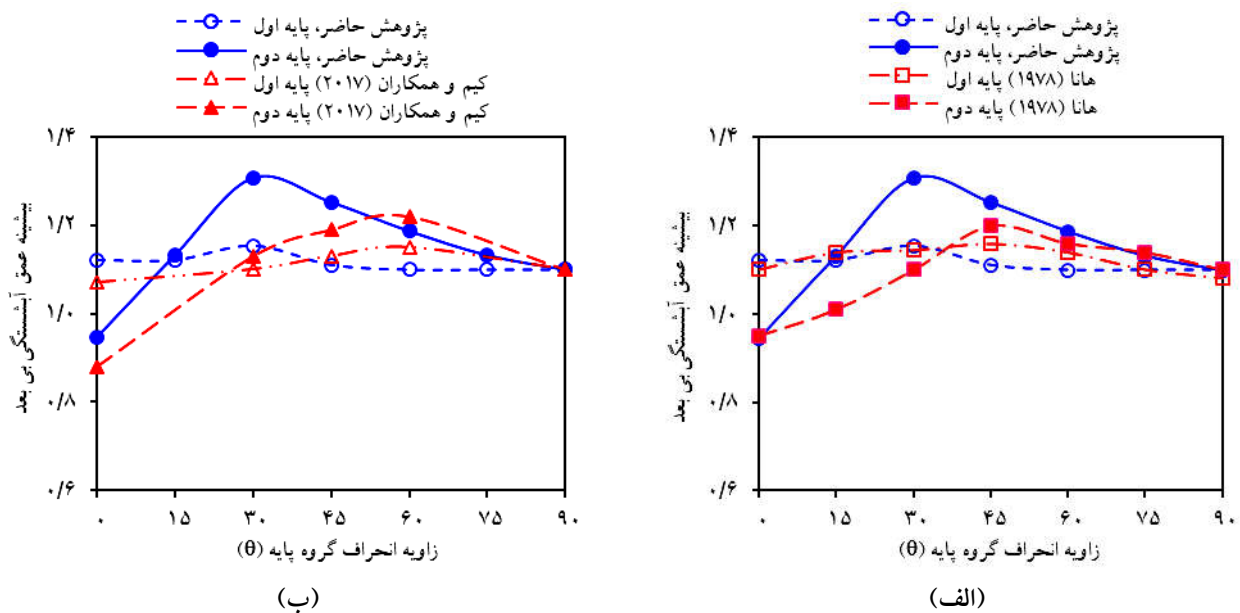


شکل ۶. نیمرخ طولی تغییرات تراز بستر پیرامون تک پایه و گروه پایه با دو آرایش ۱×۲ و ۱×۳ در زاویه صفر درجه

است. محور عمودی بیانگر نسبت بی بعد بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه های اول و دوم به بیشینه عمق آبشستگی تک پایه و محور افقی بیانگر زاویه انحراف گروه پایه است. همان طور که دیده می شود، روند تغییرات بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه اول با مطالعه هانا (۷) و کیم و همکاران (۹) مطابقت دارد و نسبت به افزایش زاویه انحراف تغییرات محسوسی را نشان نمی دهد. همچنین روند تغییرات عمق آبشستگی پایه دوم نیز مشابه با مطالعات مورد مقایسه با افزایش زاویه انحراف گروه پایه تا مقدار مشخصی افزایش می یابد و پس از آن کاهش پیدا می کند. بیشینه عمق آبشستگی در مطالعه هانا (۷) در زاویه ۴۵ درجه و در مطالعه کیم و همکاران (۹) در زاویه ۶۰ درجه و پیرامون پایه دوم گزارش شده است. تفاوت در نتایج می تواند ناشی از تفاوت شرایط آزمایشگاهی مطالعات مورد بررسی باشد. در هر دو پژوهش هانا (۷) و کیم و همکاران (۹) نسبت فاصله به قطر پایه برابر با ۵ است. همچنین زمان آزمایش های مطالعه حاضر ۱۰ ساعت در نظر گرفته شد که این زمان برای مطالعات هانا (۷) ۷ ساعت است.

اثر حفاظتی پایه های بالادست بر پایه های پایین دست و همچنین اثر تقویتی پایه سوم بر پایه دوم به طور کامل از بین می رود و هر پایه به صورت یک پایه مستقل رفتار می کند. در نتیجه در زاویه انحراف ۴۵ درجه، بیشینه عمق آبشستگی پایه های دوم و سوم کاهش یافت و میزان آن برای هر سه پایه برابر شد. از آنجایی که مکانیزم به هم فشردگی گردابه های نعل اسبی برای پایه اول و مکانیزم گردابه های جاری برای پایه های دوم و سوم همچنان وجود داشت؛ بنابراین بیشینه عمق آبشستگی همواره بیش از تک پایه بود. بر اساس نتایج حاصل از شکل ۵ و در یک نتیجه گیری کلی می توان بیان کرد، کمترین و بیشترین عمق آبشستگی گروه پایه در هر دو آرایش ۱×۲ و ۱×۳ به ترتیب در زوایای ۰ و ۳۰ درجه رخ داده است. همچنین بیشینه عمق آبشستگی گروه پایه در آرایش ۱×۲ در محدوده زوایای $15 < \theta < 90$ پیرامون پایه دوم و در آرایش ۱×۳ در محدوده زوایای $15 \leq \theta < 45$ پیرامون پایه سوم رخ داده است.

در شکل ۷ تغییرات بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه های اول و دوم گروه پایه با آرایش ۱×۲ در مطالعه حاضر به تفکیک با مطالعه هانا (۷) و مطالعه کیم و همکاران (۹) مقایسه شده



شکل ۷. مقایسه روند تغییرات بیشینه عمق آبهستگی گروه پایه با آرایش ۱×۲ در مطالعه حاضر و الف) مطالعه هانا (۷) ب) مطالعه کیم و همکاران (۹)

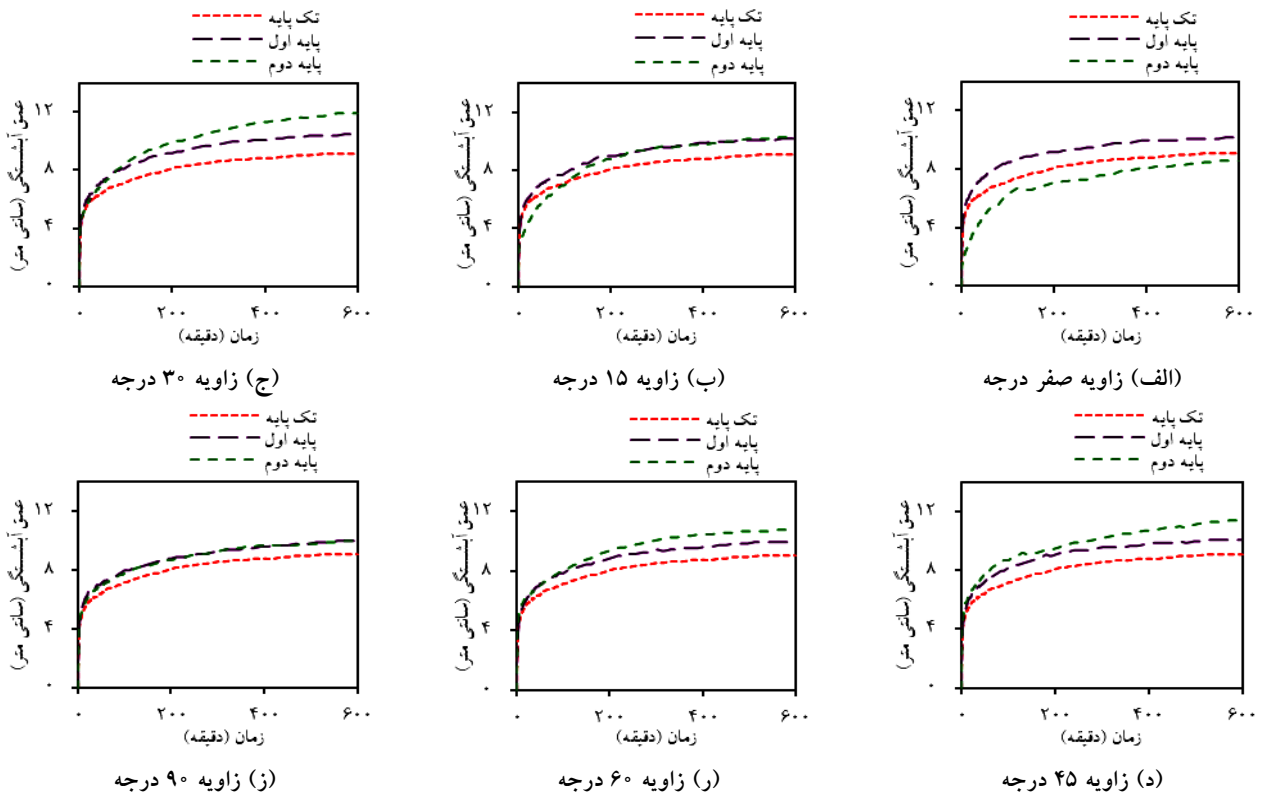
آبهستگی پیرامون پایه دوم در تمام مدت آزمایش به دلیل مکانیزم حفاظتی پایه اول و ریزش رسوبات، کمتر از عمق آبهستگی تک پایه و پایه اول است. در زاویه ۱۵ درجه نیز نتایج مشابهی با زاویه صفر درجه تا دقیقه ۱۱۰ دیده شد. اما با توسعه حفره آبهستگی پایه اول و کاهش ریزش رسوبات ناشی از پشته رسوبی آن به حفره پایه دوم، عمق آبهستگی پایه دوم افزایش یافت و از دقیقه ۲۰۰ به بعد برابر با پایه اول شد. با قرارگیری گروه پایه در زاویه ۳۰ درجه عمق آبهستگی پیرامون پایه دوم به دلیل اثر مکانیزم گردابه‌های جاری با شیب بیشتری نسبت به پایه اول افزایش می‌یابد؛ بنابراین بیشینه عمق آبهستگی پیرامون پایه دوم رخ می‌دهد. با افزایش زاویه انحراف جریان شیب تغییرات عمق آبهستگی پیرامون پایه دوم کاهش می‌یابد و در زاویه ۹۰ که هر دو پایه در شرایط یکسان در مقابل جریان قرار گرفته‌اند، عمق آبهستگی پیرامون پایه‌ها در کل زمان آزمایش برابر می‌شود.

شکل ۹ نشان می‌دهد که روند تغییرات عمق آبهستگی پیرامون پایه اول در گروه پایه با آرایش ۱×۳ مشابه با پایه اول گروه پایه

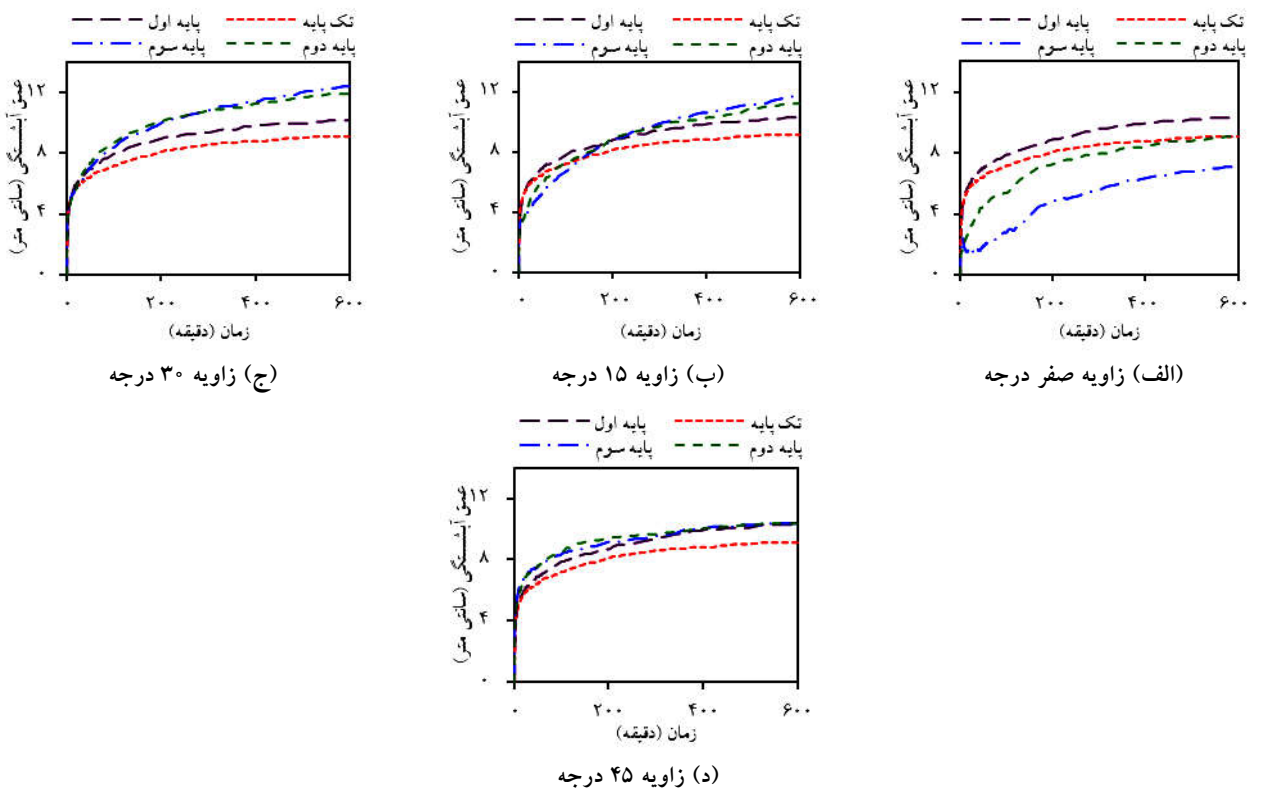
مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش و مطالعه لانکا و همکاران (۱۱) نیز تطابق خوبی را نشان می‌دهد. ایشان با بررسی عمق آبهستگی پیرامون گروه پایه با آرایش مختلف در زوایای انحراف صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نتیجه گرفتند که بیشینه عمق آبهستگی در زاویه ۳۰ درجه رخ می‌دهد.

بررسی توسعه زمانی عمق آبهستگی پیرامون گروه پایه

تغییرات زمانی عمق آبهستگی پیرامون پایه‌های گروه پایه برای دو آرایش ۱×۲ و ۱×۳ به ازای زوایای انحراف مختلف به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که روند تغییرات زمانی عمق آبهستگی پیرامون پایه اول در تمام زوایای انحراف مشابه با تک پایه است؛ به طوری که در زمان ابتدایی آزمایش عمق آبهستگی به سرعت و با یک شیب شدید افزایش می‌یابد و پس از آن با توسعه حفره آبهستگی شیب تغییرات عمق آبهستگی کاهش یافته و در نهایت به عمق آبهستگی تعادلی می‌رسد. مشاهده می‌شود که در حالت قرارگیری گروه پایه در زاویه صفر درجه (شکل ۸-الف)، عمق



شکل ۸. تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون تک پایه و پایه‌های اول و دوم گروه پایه با آرایش ۱×۲ در زوایای انحراف مختلف



شکل ۹. تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون تک پایه و پایه‌های اول، دوم و سوم گروه پایه با آرایش ۱×۳ در زوایای انحراف مختلف

توسعه پیدا کرده است. محاسبات نشان داد که حجم آبشستگی پیرامون گروه پایه در زاویه انحراف ۳۰ و در آرایش ۱×۲ حدود ۵۳ درصد و در آرایش ۱×۳ حدود ۷۳ درصد بیش از زاویه صفر درجه است. با دقت در این شکل‌ها، اثر آرایش گروه پایه و زاویه انحراف جریان بر روی توسعه ابعاد آبشستگی و اثر متقابل آن بر کاهش پایداری پایه‌های پل به خوبی دیده می‌شود.

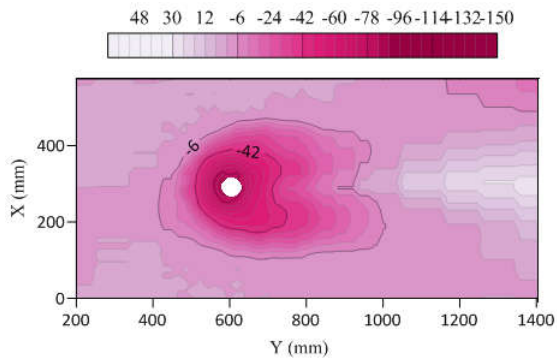
نتیجه گیری

در این پژوهش اثر زاویه انحراف گروه پایه نسبت به جهت جریان بر بیشینه عمق آبشستگی و توسعه زمانی آن پیرامون پایه‌ها در دو آرایش مختلف ۱×۲ و ۱×۳ در شرایط بستر آب زلال بررسی شد. گروه پایه با آرایش‌های ۱×۲ و ۱×۳ به ترتیب در زوایای صفر تا ۹۰ و صفر تا ۴۵ درجه نسبت به جهت جریان قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین عمق آبشستگی پایه اول به طور متوسط در همه زوایای انحراف برای گروه پایه با آرایش ۱×۲ و ۱×۳ به ترتیب ۱۱/۴۶ و ۱۲/۹۱ درصد بیش از تک پایه است. در حالت قرارگیری گروه پایه در زاویه صفر درجه، بیشینه عمق آبشستگی همواره پیرامون پایه اول رخ می‌دهد و مقدار آن برای پایه‌های پایین دست کاهش می‌یابد. محاسبات نشان داد که در زاویه صفر درجه، بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه اول گروه پایه در آرایش ۱×۲ حدود ۱۸/۶ درصد بیش از پایه دوم و در آرایش ۱×۳ به ترتیب ۱۳/۲ و ۴۳ درصد بیش از پایه‌های دوم و سوم است. تغییر زاویه انحراف گروه پایه تأثیر محسوسی بر بیشینه عمق آبشستگی پیرامون پایه اول گروه پایه در آرایش‌های مختلف ندارد؛ اما روی بیشینه عمق آبشستگی و ابعاد حفره آبشستگی پیرامون پایه‌های دوم و سوم گروه پایه به شدت تأثیر گذار است. در زاویه انحراف ۳۰ درجه، شیب منحنی تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون پایه‌های دوم و سوم گروه پایه‌ها افزایش یافت و بیشینه عمق آبشستگی گروه پایه برای هر دو آرایش ۱×۲ و ۱×۳ در زاویه ۳۰ درجه و به ترتیب پیرامون پایه دوم و سوم به وقوع پیوست. در این شرایط بیشینه عمق آبشستگی

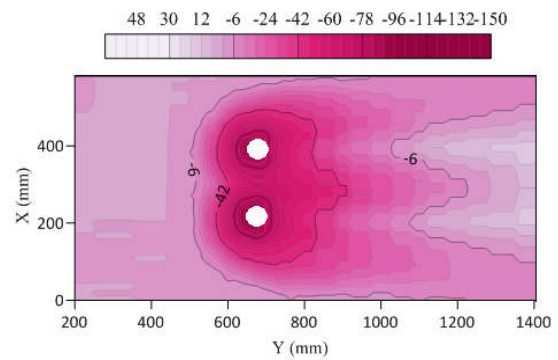
با آرایش ۱×۲ است. در ضمن در زاویه صفر درجه عمق آبشستگی پیرامون پایه سوم در تمام مدت آزمایش کمتر از عمق آبشستگی پایه‌های اول و دوم و تک پایه است. در زوایای ۱۵ و ۳۰ درجه شیب تغییرات زمانی عمق آبشستگی پیرامون پایه‌های دوم و سوم با روند مشابهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین عمق آبشستگی پیرامون پایه‌های دوم و سوم در زوایای ۱۵ و ۳۰ درجه به ترتیب در زمان‌های بزرگ‌تر از ۲۰۰ و ۴۶ دقیقه بیش از عمق آبشستگی پایه اول می‌شود. در زاویه ۴۵ درجه روند تغییرات عمق آبشستگی پیرامون هر سه پایه تا حدودی مشابه است.

بررسی الگوی آبشستگی پیرامون گروه پایه

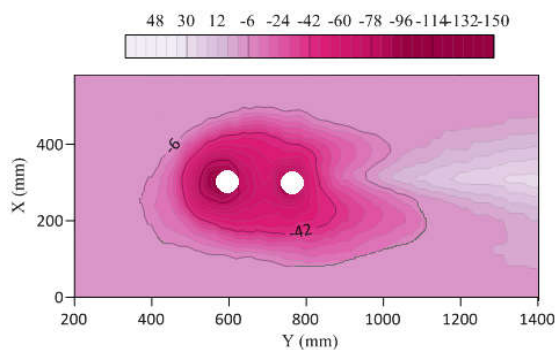
باتوجه به تعامل پیچیده گردابه‌های پیرامون پایه‌ها در گروه پایه، توپوگرافی حفره آبشستگی پیرامون گروه پایه تحت تأثیر آرایش گروه پایه و زاویه انحراف آن قرار می‌گیرد. الگوی آبشستگی پیرامون تک پایه و گروه پایه با آرایش مختلف و در زوایای انحراف متفاوت با جریان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، حفره‌های آبشستگی پیرامون پایه‌های گروه پایه با هم ادغام شده و مرز مشخصی بین آن‌ها وجود ندارد؛ بنابراین الگوی آبشستگی گروه پایه‌ها در زاویه صفر درجه مشابه با تک پایه است. با افزایش تعداد پایه‌ها در راستای جریان، ابعاد محدوده تحت تأثیر آبشستگی از نظر طولی و عرضی افزایش می‌یابد. به منظور بررسی و مقایسه میزان آبشستگی در تک پایه و گروه پایه در آرایش مختلف، حجم آبشستگی بستر رسوبی با استفاده از نرم افزار Surfer محاسبه شد. نتایج نشان داد که حجم آبشستگی گروه پایه در آرایش ۱×۲ و ۱×۳ در زاویه صفر درجه به ترتیب ۷۳ و ۱۱۶ درصد بیش از حجم آبشستگی تک پایه است. با افزایش زاویه انحراف گروه پایه، افزون بر گسترش ابعاد حفره آبشستگی پیرامون پایه (پایه‌های) پایین دست، محدوده وسیع تری از بستر رسوبی پایین دست گروه پایه در معرض آبشستگی قرار می‌گیرد. همچنین الگوی آبشستگی هم در امتداد انحراف گروه پایه و هم در خلاف جهت انحراف آن



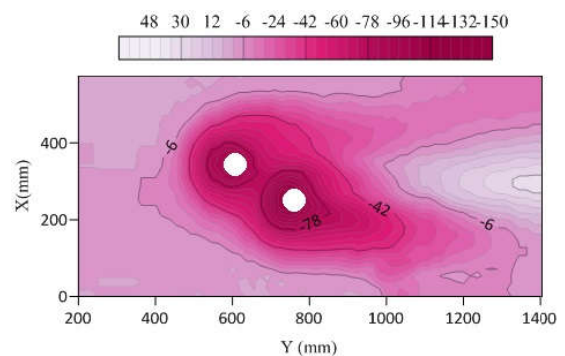
تک پایه



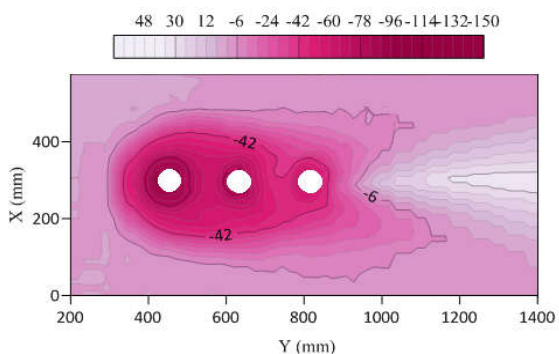
گروه پایه با آرایش ۲×۱



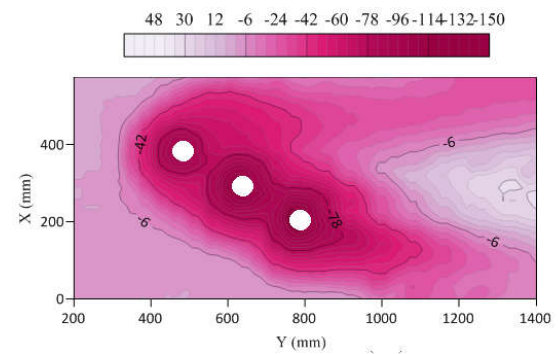
گروه پایه با آرایش ۱×۲ و زاویه صفر درجه



گروه پایه با آرایش ۱×۲ و زاویه انحراف ۳۰ درجه



گروه پایه با آرایش ۱×۳ و زاویه صفر درجه



گروه پایه با آرایش ۱×۳ و زاویه انحراف ۳۰ درجه

شکل ۱۰. الگوی آبهستگی پیرامون تک پایه و گروه پایه در آرایش های مختلف برای زوایای انحراف صفر و ۳۰ درجه

$15 < \theta < 90$ و پیرامون پایه دوم و برای آرایش ۱×۳ در محدوده زوایای $15 \leq \theta < 45$ و پیرامون پایه سوم رخ می دهد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز قدردانی می شود (SCU.WH99.31373).

پیرامون پایه دوم ۱۳/۳۳ درصد و پیرامون پایه سوم ۲۱/۵۷ درصد بیش از پایه اول شد، همچنین در زاویه ۳۰ درجه حجم آبهستگی پیرامون گروه پایه در آرایش ۱×۲ حدود ۵۳ درصد و در آرایش ۱×۳ حدود ۷۳ درصد بیش از زاویه صفر درجه برآورد شد. بررسی محل وقوع بیشینه عمق آبهستگی در زوایای انحراف مختلف نشان داد که بیشینه عمق آبهستگی گروه پایه برای آرایش ۱×۲ در محدوده زوایای

منابع مورد استفاده

1. Adib, A., M. Shafai Bejestan and V. Shiri. 2019. on the local scour around group piers in series by experimental tests. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 7(1): 21-34.
2. Ataie-Ashtiani, B and A. A. Beheshti. 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(10): 1100-1104.
3. Ataie-Ashtiani, B and A. Aslani-Kordkandi. 2013. Flow field around single and tandem piers. *Flow, Turbulence and Combustion* 90(3): 471-490.
4. Amini, A and A. Eghbal Zadeh. 2012. Experimental investigation of the effect of pile group arrangement on scour depth in bridge piles. *Iranian Water Research Journal* 6(11): 95-103 (in Farsi).
5. Chiew, Y. M and B. W. Melville. 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1): 15-26.
6. Dey, S., Bose, S. K. and Sastry, G. L. N. 1995. Clear Water Scour at Circular Piers: a model. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(12): 869-876.
7. Hannah, C. R. 1978. Scour at pile groups. PhD Thesis. University of Canterbury, NZ. *Civil Engineering Research Rep* (78-3): 92.
8. Keshavarzi, A., C. K. Shrestha, B. Melville, H. Khabbaz, M. Ranjbar-Zahedani and J. Ball. 2018. Estimation of maximum scour depths at upstream of front and rear piers for two in-line circular columns. *Environmental Fluid Mechanics* (18): 537-550.
9. Kim, H. S., M. Roh and M. Nabi. 2017. Computational modeling of flow and scour around two cylinders in staggered array. *Water* 9(9): 654.
10. Lança, R., C. Fael, J. Pêgo, R. Maia and A. Cardoso. 2012. Effect of spacing and skew-angle on clear-water scour at pier alignments. *River Flow 2012*. R. Muñoz, ed., CRC Press, Boca Raton, FL. 927-933.
11. Lança, R., C. Fael, R. Maia, J. P. Pêgo and A. H. Cardoso. 2013. Clear-water scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(10): 1089-1098.
12. Melville, B. W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(1): 59-65.
13. Melville, B. W and S. E. Coleman. 2000. Bridge Scour. Water Resources Publication. LLC, Denver.
14. Memar, S., M. Zounemat Kermani, M. Rahimpour, A. A. Beheshti and A. J. Schleiss. 2019. An investigation on the impacts of the skew angle on two bridge piers with respect to the flow direction on the equilibrium scour depth at the piers front. *Journal of Hydraulics* 14(1): 107-121 (in Farsi).
15. Nazariha, M. 1996. Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups. PhD Thesis presented to the University of Ottawa, Canada.
16. Nouh, M. 1986. Local scour at pile groups in meandering channels. In *Symposium on Scale Effects In Modelling Sediment Transport Phenomena*, IAHR, Toronto, Canada.
17. Okhravi, S. S. and S. Gohari. 2021. Local scour at single column arrangement of bridge piles group. *Journal of Water and Soil Science (JWSS)* 24(4): 57-73 (in Farsi).
18. Pourghasemzadeh, B. and M. Ghomeshi. 2022. Experimental investigation of the angle effect of the cylindrical bridge group piers relative to the flow direction on the maximum scour depth of the piers. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)* 45(3): 131-145 (in Farsi).
19. Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(3): 338-350.
20. Solaimani, N., A. Amini, H. Banejad and P. Taherei Ghazvinei. 2017. The effect of pile spacing and arrangement on bed formation and scour hole dimensions in pile groups. *International Journal of River Basin Management* 15(2): 219-225.
21. Zhao, G. and D. M. Sheppard. 1999. The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups. In *Stream stability and scour at highway bridges: Compendium of stream stability and scour papers presented at conferences sponsored by the Water Resources Engineering (Hydraulics) Division of the American Society of Civil Engineers*. PP.377-391. ASCE.
22. Zhou, K., J. G. Duan and F. A. Bombardelli. 2020. Experimental and theoretical study of local scour around three-pier group. *Journal of Hydraulic Engineering* 146(10): 04020069.

Experimental Investigation of the Effect of the Pier Group Skew Angle on Local Scour Around the Piers under Steady Flow

L. Hashemi*, S. M. Kashefipour, M. Ghomeshi and M. Bahrami Yarahmadi¹

(Received: September 29-2023 ; Accepted: January 21-2024)

Abstract

Local scour around bridge piers is one of the most significant factors for the bridges' destruction. Therefore, it is necessary to investigate the scour depth around the bridge piers. The effect of the skew angle of the single-column pier group related to the flow direction in two different arrangements including 1×2 and 1×3 piers on the maximum scour depth around the pier group was investigated in this study. The experiments were carried out under steady flow conditions. The pier group was placed in the 1×2 arrangement at the skew angles of 0 to 90 degrees and in the 1×3 arrangement at the skew angles of 0 to 45 degrees. The results showed that increasing the skew angle of the pier group is almost ineffective on the maximum scour depth around the first pier. However, it has a great effect on the maximum scour depth, its temporal development, and the expansion of the scour hole around the second and third piers in different arrangements of the pier groups. The maximum scour depth of the pier group in both different arrangements occurred at a skew angle of 30 degrees, in the arrangement of 1×2 around the second pier and by 13.33% more than the first pier and in the arrangement of 1×3 around the third pier and by 21.57% more than the first pier.

Keywords: Local scour, Pier group, Skew angle, Steady flow

1. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding author, Email: Leila-hashemi@stu.scu.ac.ir