

بررسی آزمایشگاهی و عددی آبشستگی اطراف گروه پایه کج با حضور شمع حفاظتی و طوق

فاطمه جعفری اول^۱، اکرم عباسپور^۲، هادی ارونقی^۳، علی حسین زاده دلیر^۴

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،

۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، akabbaspour@yahoo.com

۳- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، arvanaghi.hadi@gmail.com

۴- استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ahdalir@tabrizu.ac.ir

چکیده

آبشستگی سالیان طولانی در علم هیدرولیک مورد مطالعه بوده است، با توجه به شرایط و پیچیدگی‌های آن، همچنان مورد توجه محققین علم هیدرولیک قرار گرفته است. سازه‌های هیدرولیکی که به صورت مانعی در برابر جریان آب قرار دارند الگوی جریان در نزدیکی خود را تغییر داده و به صورت موضعی باعث آبشستگی در اطراف سازه می‌شوند. روش‌های مختلفی برای کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه‌ها بیان شده است. در این تحقیق برای کاهش آبشستگی موضعی اطراف سه پایه از گروه پایه کج به همراه شمع حفاظتی و طوق استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با قرارگیری شمع حفاظتی در جلوی گروه پایه کج، تأثیر زاویه کج شدگی پایه در کاهش آبشستگی کمتر است به طوری که اختلاف درصد کاهش آبشستگی برای پایه کج اول و کج دوم بین زاویه ۵ و ۱۵ درجه صفر بوده و برای پایه قائم ۱/۴ درصد کاهش داشته است. استفاده از سه طوق به قطر ۴b در گروه پایه با فاصله بین پایه‌های ۴b و وجود شمع حفاظتی در جلوی پایه کج اول به فاصله ۳b نسبت به فاصله ۲b به ترتیب کاهش ۱۲/۸۶، ۲۱/۸۵ و ۱۲ درصدی عمق آبشستگی در جلوی پایه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج مدل عددی نشان می‌دهد که استفاده از گروه پایه کج با فاصله بین پایه‌های ۳b و با حضور شمع حفاظتی به فاصله ۲b از پایه اول نسبت به فاصله‌های b و ۳b شدت تلاطم از مقدار ۰/۰۸۹ به مقدار ۰/۱۱ رسیده است.

کلمات کلیدی: آبشستگی موضعی، زاویه کج شدگی پایه، شمع حفاظتی، طوق، گروه پایه کج

آبشستگی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش شرایط جریان و حرکت مصالح بستر در کناره رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، در اثر عبور جریان صورت می‌گیرد. عمق ناشی از فرسایش بستر نسبت به بستر اولیه را عمق آبشستگی می‌نامند. پل‌ها از جمله مهمترین و پرکاربردترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند که از دیرباز مورد استفاده قرار می‌گرفتند و همه ساله همراه با بروز سیلاب‌هایی در هر رودخانه، تعداد کثیری از این پل‌ها آن هم درست زمانی که نیاز به آنها وجود دارد تخریب می‌گردند. یکی از مهمترین و مؤثرترین عوامل این تخریب‌ها آبشستگی اطراف پایه‌های پل ناشی از جریان رودخانه می‌باشد [۳]. پدیده آبشستگی در اطراف پایه بسیار پیچیده بوده و از آنجا که عوامل زیادی در شکل‌گیری این پدیده مؤثر هستند، بررسی این پدیده در آزمایشگاه یا شبیه‌سازی عددی آن مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است.

به دلایل ژئوتکنیکی و اقتصادی، استفاده از گروه پایه‌ها در طراحی پایه‌ها افزایش یافته است. استفاده از گروه پایه به طور قابل توجهی هزینه‌های ساخت و ساز را در مقایسه با تک پایه در زمان وقوع آبشستگی کاهش می‌دهد. با این وجود مکانیسم آبشستگی در گروه پایه‌ها پیچیده بوده و پیش‌بینی عمق آبشستگی مشکل است [۳]. بوزکوس و چشمه (۲۰۱۰) به طور آزمایشگاهی کاهش عمق آبشستگی موضعی در اطراف دو پایه کج را به قطر پایه‌های (b) ۲۵، ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر مورد مطالعه قرار دادند. عمق جریان آب (d_0) در کانال مختلف بوده است. زوایای کج‌شدگی پایه در راستای عمودی (β) ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه بوده است. عمق آبشستگی در جلو و پشت پایه کج اول و در جلوی پایه کج دوم اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که عمق آبشستگی با افزایش زاویه کج‌شدگی پایه کاهش می‌یابد. به طوری که برای زاویه کج‌شدگی ۱۵ درجه، عمق آبشستگی ۶۰ درصد نسبت به زاویه صفر درجه کاهش داشته است. همچنین ارتفاع رسوبات جمع شده در پشت پایه کج دوم با زاویه کج‌شدگی ۱۵ درجه کاهش یافته است. با افزایش قطر پایه‌ها، عمق آبشستگی در اطراف هر دو پایه افزایش یافته است و رسوبات جمع شده در پشت پایه دوم بیشتر بوده است. آن‌ها با استفاده از داده‌های بوزکوس و ییلدیز (۲۰۰۴) رابطه ۱ را برای تعیین عمق آبشستگی در جلوی پایه کج با دانه‌بندی یکنواخت ارائه داده‌اند.

$$\frac{d_s}{b} = 0.455 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.202} \left(\frac{u}{u_c} \right)^{0.591} \alpha^{1.725} \quad (1)$$

در این رابطه y عمق جریان، b قطر پایه، d_s عمق آبشستگی، u سرعت جریان، u_c سرعت در آستانه حرکت و β زاویه پایه و α متهم زاویه پایه پل بر حسب رادیان می‌باشد.

واقفی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر زوایای کج‌شدگی ۷، ۱۴ و ۲۱ درجه را با کج‌شدگی به سمت پایین دست جریان، روی آبشستگی پایه پل بررسی کردند. سرعت نسبی جریان ۰/۸، ۰/۸۶، ۰/۹۲ و ۰/۹۸ در نظر گرفته شده است. در شرایط یکسان، افزایش در زاویه کج‌شدگی جریان منجر به کاهش ابعاد پشته رسوبی و حفره آبشستگی گردید. با افزایش سرعت نسبی، عمق حفره آبشستگی افزایش می‌یابد و ارتفاع پشته ایجاد شده در پشت پایه کاهش می‌یابد. با استفاده از رابطه ۲ عمق آبشستگی در پایه کج را می‌توان محاسبه کرد.

$$d_s = k_{yb} k_i k_D k_s k_{in} \quad (2)$$

در رابطه ۲، d_s ، k_{yb} ، k_i ، k_D ، k_s ، k_{in} به ترتیب عمق آبشستگی، ضریب عمق جریان، ضریب شدت جریان، ضریب شکل پایه و ضریب زاویه پایه می‌باشند.

آقای شلمانی و حکیم زاده (۲۰۱۵) آبشستگی اطراف پایه‌های مخروطی شکل را تحت شرایط آب زلال بررسی کردند. پایه‌ها با زاویه‌های شیب کناری مختلف (۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ درجه) و دو نوع سطح مقطع (دایره‌ای و بیضی شکل) بودند. بیشترین کاهش عمق آبشستگی در بالادست پایه مخروطی شکل با شیب جانبی ۱۵ درجه در حدود ۳۶ درصد بوده و برای سطح مقطع بیضی ۴۳ درصد کاهش وجود داشته است. همچنین بیشترین کاهش عمق آبشستگی برای پایه‌های مخروطی شکل با زاویه شیب ۱۵ درجه در پایین دست پایه ۵۳ درصد بدست آمد.

زراتی و همکاران (۲۰۱۰) برای کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل از ترکیب طوق و ریپرپ استفاده کردند. طوق بر روی سطح بستر قرار گرفته است. اندازه طوق ۲ و ۳ برابر قطر پایه (b) در نظر گرفته شد. کاهش آبشستگی برای پایه با استفاده از طوق به قطر 2b و

3b به ترتیب ۲۰ و ۲۶ درصد به دست آمد. همچنین استفاده از طوق اندازه لایه ریپ رپ را در جلو و کناره‌های پایه کاهش می‌دهد. به طوری که با طوق به اندازه 3b استفاده از لایه ریپ رپ کاملاً حذف می‌شود. محدوده مورد نیاز برای پوشاندن با لایه ریپ رپ در سه حالت بدون طوق، با طوق به قطر 2b و 3b به ترتیب $12.76b^2$ و $7.99b^2$ می‌باشد. این نتایج نشان داد که با فرض ضخامت ثابت لایه ریپ رپ، حجم لایه ریپ رپ برای طوق به قطر 2b و 3b به ترتیب ۳۱ و ۵۷ درصد کمتر از حالت بدون طوق می‌باشد. همچنین زراتی و همکاران (۲۰۰۶) کاهش آبشستگی در دو پایه را با استفاده از طوق و ریپ رپ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای دو پایه هم‌امتداد طوق تأثیر بیشتری در کاهش آبشستگی نسبت به دو پایه عمود بر مسیر جریان دارد.

حسینی و همکاران (۲۰۱۶) تغییرات عمق آبشستگی دو پایه کج مستطیلی با زاویه ۲۸ درجه بر روی گروه شمع با آرایش ۲×۲ و ۲×۳ با قطرهای نسبی ۰/۶ و ۰/۹ برای دو ضخامت نسبی سرشمع ۰/۹ و ۱/۴ و نیز در ترازهای نسبی مختلف کارگذاری سرشمع ۱/۵، ۱، ۰/۵، صفر و در حالت مدفون ۰/۷- و ۱/۲- را در آزمایشگاه بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با تغییر دادن آرایش شمع‌ها از ۲×۲ به ۲×۳ در قطرهای نسبی شمع ۰/۶ و ۰/۹ عمق آبشستگی ماکزیمم به ترتیب ۵۰ و ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. با قرارگیری سرشمع هم‌تراز بستر و در حالت مدفون، تغییر دادن آرایش و قطر شمع‌ها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عمق آبشستگی وجود ندارد. بررسی تأثیر ضخامت سرشمع در ترازهای نسبی کارگذاری سرشمع بالای بستر نشان داد با افزایش ضخامت نسبی سرشمع از ۰/۹ به ۱/۴، برای قطرهای مختلف شمع عمق آبشستگی ۲۰ درصد افزایش یافت. همچنین با قرارگیری سرشمع بالای بستر و افزایش قطر شمع‌ها از ۰/۶ به ۰/۹ و در آرایش‌های شمع ۲×۲ و ۲×۳، عمق آبشستگی ۵ و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

ملویل و هادفیلد (۱۹۹۹) برای کاهش آبشستگی موضعی پایه پل از شمع‌های حفاظتی استفاده کردند. شمع‌های قرار گرفته در بالادست پایه با آرایش‌های مختلف و با زاویه نسبت به جریان بودند. آرایش مثلی با قرارگیری نوک آن در بالادست جریان بهترین ترکیب برای قرارگیری شمع است. در حالت کلی، شمع‌ها برای شرایط جریان با سرعت نسبی کم و بدون زاویه قرارگیری نسبت به جریان مناسب هستند.

ونگ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی آزمایشگاهی و عددی شمع‌های حفاظتی در کاهش آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پرداختند. در حالت کلی نتایج آرایش‌های مختلف قرارگیری شمع نشان داد که استفاده از شمع حفاظتی زمان مورد نیاز برای رسیدن به تعادل را کاهش می‌دهد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی نیز نشان می‌دهد که استفاده از شمع حفاظتی در کاهش عمق آبشستگی مؤثر است. مقدار کاهش در عمق آبشستگی با آرایش شمع حفاظتی تغییر می‌کند. همچنین تأثیر گروه شمع در کاهش آبشستگی بهتر از حالت یک شمع می‌باشد.

محمودی و حیدرپور (۲۰۱۶) برای کاهش آبشستگی پایه‌های پل از شمع‌های حفاظتی استفاده کردند. شمع‌های حفاظتی با آرایش مثلی و تعداد آن ۵ عدد بود. فاصله افقی شمع‌ها از یکدیگر ۰/۷، ۱ و ۱/۳ برابر قطر پایه و قطر پایه ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که کاهش زاویه و فاصله افقی شمع‌ها راندمان شمع را افزایش می‌دهد.

در این تحقیق برای کاهش آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه کج از شمع حفاظتی و طوق استفاده شده است که تاکنون برای کاهش آبشستگی گروه پایه کج از این روش‌ها استفاده نشده است و همچنین تأثیر توأم طوق و شمع حفاظتی اطراف گروه پایه کج و تغییر زاویه کج شدگی پایه همراه با شمع حفاظتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی به روش پی‌باکینگهام به کمیتهای بدون بعد تبدیل نموده و رابطه نهایی مربوط عمق آبشستگی استخراج گردید. همچنین با استفاده از مدل عددی الگوی جریان در فواصل مختلف بین شمع حفاظتی و پایه کج اول بررسی شده است.

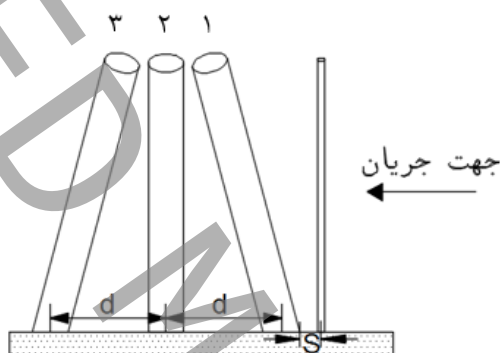
۲- مواد و روش‌ها

الف) مدل آزمایشگاهی

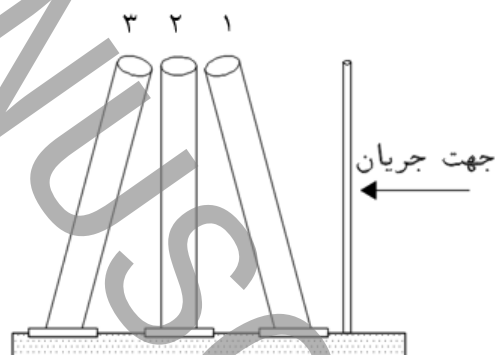
آزمایش‌ها در کانالی به طول ۶ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شده است. دبی جریان با استفاده از سرریز مستطیلی کالیبره شده در انتهای کانال اندازه‌گیری شده است. ارتفاع آب توسط عمق

سنگ تعبیه شده روی کانال با دقت ۰/۱ میلی متر اندازه گیری شد. منطقه انجام آزمایش ها محدوده ۲ متری در وسط کانال در نظر گرفته شد که مصالح غیرچسبنده ماسه ای استفاده گردید. طبق معیار رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) برای جلوگیری از تشکیل فرم بستر اندازه متوسط ذرات (d_{50}) بایستی بیشتر از ۰/۷ میلی متر باشد. در این تحقیق اندازه متوسط ذرات ۰/۸ میلی متر بوده است. طبق تحقیقات چانگ و همکاران (۲۰۰۴) برای ذرات بستر یکنواخت انحراف معیار هندسی ذرات در محدوده ۱/۱ تا ۱/۴ می باشد. در این تحقیق نیز انحراف معیار هندسی ۱/۲۵ تعیین شد. گروه پایه در وسط بستر رسوبی قرار داده شد. طبق معیارهای چپو و ملویل (۱۹۸۷)، ملویل و چپو (۱۹۹۹) و ارونقی و همکاران (۲۰۰۶) به ترتیب برای نسبت عمق جریان به قطر پایه، نسبت اندازه ذرات به قطر پایه و نسبت عرض کانال به قطر پایه، قطر پایه (b) ۳/۴ سانتی متر انتخاب شده است. در شکل ۱ گروه پایه کج با شمع حفاظتی و گروه پایه کج با طوق و شمع حفاظتی نشان داده شده است. پایه وسط به صورت قائم می باشد. بر اساس استاندارد Wisconsin زاویه کج شدگی پایه پل نسبت به محور عمودی کمتر از ۱۵ درجه در نظر گرفته می شود. در این تحقیق زوایای کج شدگی پایه اول و سوم (θ)، ۵ و ۱۰ و ۱۵ درجه بوده و فاصله بین پایه ها (d) ۳ و ۴ برابر قطر پایه است.

(الف)



(ب)



شکل ۱. الف) تصویر آزمایشگاهی گروه پایه کج با شمع حفاظتی ب) گروه پایه کج با طوق و شمع حفاظتی

Fig. 1. Experimental photo of inclined pier group with sacrificial pile b) Inclined pier group with collar and sacrificial pile

برای کاهش آبشستگی از صفحات طوق به شکل دایره با دو اندازه ۳ و ۴ برابر قطر پایه اصلی و هم‌مرکز با پایه و با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. محل قرارگیری طوق روی پایه هم‌سطح بستر رسوبی بوده است.

به نقل از آرم و قمشی (۲۰۱۳) بر اساس یافته‌های سینک و همکاران، شمع حفاظتی به قطر ۰/۳۶ قطر پایه با قرارگیری در فاصله ۲ برابر قطر پایه در بالادست پایه عمق آب‌شستگی ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. در این تحقیق از لوله فولادی به قطر ۰/۳۶ قطر پایه (۱/۲ سانتی‌متر) به عنوان شمع حفاظتی استفاده شده است. فاصله بین شمع و پایه جلویی در دو اندازه متفاوت $S=2b, 3b$ (قطر پایه) بررسی گردید. برای کاهش آبشستگی تأثیر هم‌زمان طوق و شمع حفاظتی در نظر گرفته شد. به طوری که با تغییر فواصل بین پایه‌ها و فاصله شمع تا پایه و قرارگیری طوق روی تک تک پایه‌ها به صورت گروهی و تکی، آزمایش‌هایی در آزمایشگاه انجام شد.

برای ارزیابی عمق آبشستگی به دست آمده در آزمایش‌ها از رابطه ملویل (۱۹۹۷) برای محاسبه عمق آبشستگی استفاده شد. برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی در اطراف پایه معیار تحقیق ارونقی و همکاران (۲۰۰۶) در نظر گرفته شد که در آن قطر پایه نسبت به عرض کانال نباید بیشتر از ۱۱ درصد باشد. برای جلوگیری از کاهش عمق حفره بر اساس یافته‌های چپو و ملویل (۱۹۸۷) شرط $\frac{y}{b} > 3.5$ (برای نسبت عمق جریان به قطر پایه) برقرار گردید. در جدول ۱ شرایط هیدرولیکی جریان برای انجام آزمایش برای گروه پایه کج در آبشستگی موضعی پایه پل نشان داده شده است.

همچنین مدت زمان انجام آزمایش مطابق معیار کومار و همکاران (۱۹۹۹) در نظر گرفته شده است. سرعت در آستانه حرکت جریان در آزمایش‌ها برای رسوبات ماسه‌ای با کاهش تدریجی عمق جریان و ثابت بودن دبی به دست آمده است و برای صحت سنجی آن از رابطه ملویل (۱۹۹۷) استفاده شد. سپس نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی ۰/۹ لحاظ گردید. روابط ملویل (۱۹۹۷) به صورت زیر ارائه شده است:

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4}, 0.1mm < d_{50} < 1mm \quad (3)$$

$$u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1}, 1mm < d_{50} < 100mm \quad (4)$$

$$u_c = 5.75u_{*c} \log\left(\frac{5.53y_0}{d_{50}}\right) \quad (5)$$

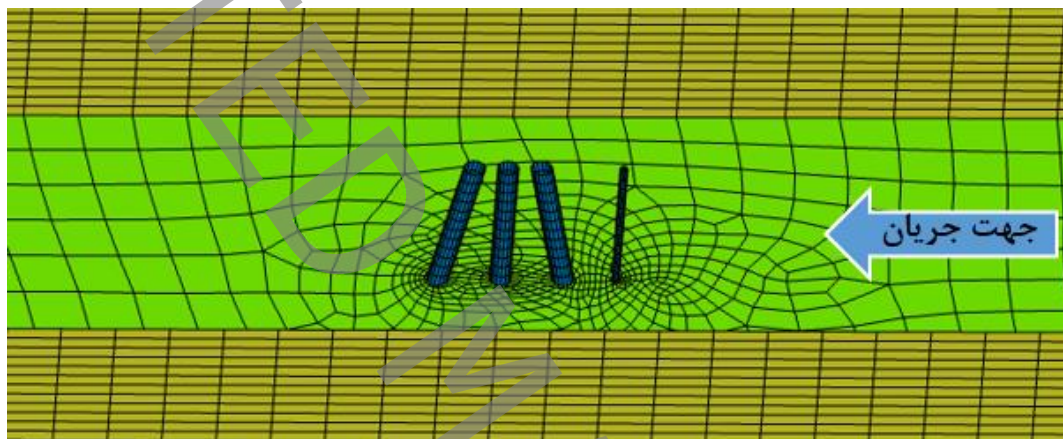
در روابط فوق، d_{50} اندازه ذرات بر حسب میلی‌متر، u_{*c} سرعت برشی آستانه حرکت بر حسب متر بر ثانیه و u_c سرعت در آستانه حرکت ذرات رسوبی می‌باشند.

جدول ۱. شرایط هیدرولیکی جریان برای بررسی آبشستگی گروه پایه کج

Table 1. Hydraulic condition of flow for investigation of inclined pier group scour

سرعت نسبی $\frac{u}{u_c}$	زمان انجام آزمایش (hr)	عدد رینولدز پایه	عدد فرود جریان	سرعت جریان $\left(\frac{m}{s}\right)$	عمق آب (m)	دبی جریان $\left(\frac{lit}{s}\right)$	
۰/۹	۱۲	۱۰۰۹۸	۰/۲۵	۰/۲۹۷	۰/۱۴۱	۳۳/۵	مدل آزمایشگاهی
-	-	۷۱۴۰	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۱۷۸	۲۹/۹	مدل عددی

برای شبیه‌سازی الگوی جریان در گروه پایه کج همراه با شمع از انسیس فلوئنت استفاده گردید. هندسه کانال در Design Modeler نرم‌افزار انسیس طراحی شد و برای مش‌بندی از خود مش^۱ و رک بنچ استفاده شده و سپس شرایط مرزی برای آن تعریف گردید و بعد فایل شبکه‌بندی به فلوئنت انتقال یافت. مدل‌های شبیه‌سازی شده دارای عرض ۸۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۱۷/۸ سانتی‌متر و طول (۶-۷/۵) متر برای گروه پایه با شمع در فواصل مختلف در نظر گرفته شده است. شرایط هیدرولیکی جریان در مدل عددی متفاوت از شرایط جریان در آزمایشگاه بوده تا تأثیر شرایط متفاوت در نظر گرفته شود. در جدول ۱ شرایط هیدرولیکی جریان در مدل عددی وجود دارد. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای ورودی از نوع Velocity inlet، خروجی از نوع Outflow، دیواره‌ها، کف و پایه پل از نوع Wall و برای صفحه بالایی از نوع Symmetry می‌باشد. در شکل ۲ شبکه‌بندی اطراف سه پایه کج همراه با شمع با زاویه کج‌شدگی ۱۵ درجه نشان داده شده است. تعداد مش ایجاد شده در مدل‌های شبکه‌بندی شده ۲۰۰۰۰ می‌باشد. برای کاهش زمان محاسبات و در نظر گرفتن نتایج، تعداد مش ۱۳۰۰۰ در نظر گرفته شد.



شکل ۲. شبکه‌بندی اطراف گروه پایه کج همراه با شمع حفاظتی

Fig. 2. Meshing around inclined pier group with sacrificial pile

برای شبیه‌سازی جریان متلاطم از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG در انسیس فلوئنت استفاده شد. کاسم (۲۰۰۶) و ایکسیانگ و همکاران (۲۰۱۴) را برای شبیه‌سازی جریان اطراف پایه‌ها مناسب معرفی کرده‌اند. برای صحت‌سنجی مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی ارونقی (۲۰۰۹) استفاده شد.

شدت تلاطم

در این تحقیق برای شبیه‌سازی الگوی جریان در اطراف پایه‌ها از مدل عددی استفاده شد. پارامتر مورد بررسی در مدل عددی شدت تلاطم بوده و وقتی جریان وارد مجرای آب می‌شود. برای تعیین مقدار تلاطم ایجاد شده می‌توان از پارامتر شدت تلاطم استفاده کرد. در انسیس فلوئنت شدت تلاطم به صورت رابطه ۶ تعریف شده است [۱۱].

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16 (Re_{DH})^{-1/8} \quad (6)$$

^۱ Mesh

که در آن u' : ریشه دوم مجذور نوسانات سرعت، u_{avg} : سرعت متوسط جریان، $Re_{DH} = \frac{D_h u_{avg}}{\rho}$: عدد رینولدز بر حسب قطر هیدرولیکی می باشند.

تحلیل ابعادی

پارامترهای مختلفی آبشستگی اطراف پایه‌های پل را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای گروه پایه‌هایی به قطر b که در فاصله d از یکدیگر قرار دارند عمق آبشستگی تابعی خواهد بود از:

$$d_s = f(y, u, \rho, g, v, d_{50}, \rho_s, u_c, \sigma_g, b, d, B, \theta, t) \quad (7)$$

که در آن y عمق جریان، u سرعت جریان، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، v لزوجت سیمناتیک، d_{50} اندازه متوسط ذرات رسوبی، ρ_s چگالی رسوب بستر، u_c سرعت آستانه حرکت، σ_g انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی، b قطر پایه پل، d فاصله بین پایه‌ها، B عرض کانال، θ زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان، t زمان از شروع آبشستگی، t_e زمان نهایی یا تعادل آبشستگی است. با به کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی رابطه 7 را می‌توان به صورت رابطه بی‌بعد 8 نوشت:

$$\frac{d_s}{b} = f_1\left(\frac{y}{b}, \frac{u^2}{gb}, \frac{ub}{v}, \frac{d_{50}}{b}, \frac{\rho}{\rho_s}, \frac{u}{u_c}, \sigma_g, \frac{d}{b}, \frac{B}{b}, \theta, \frac{ut}{b}\right) \quad (8)$$

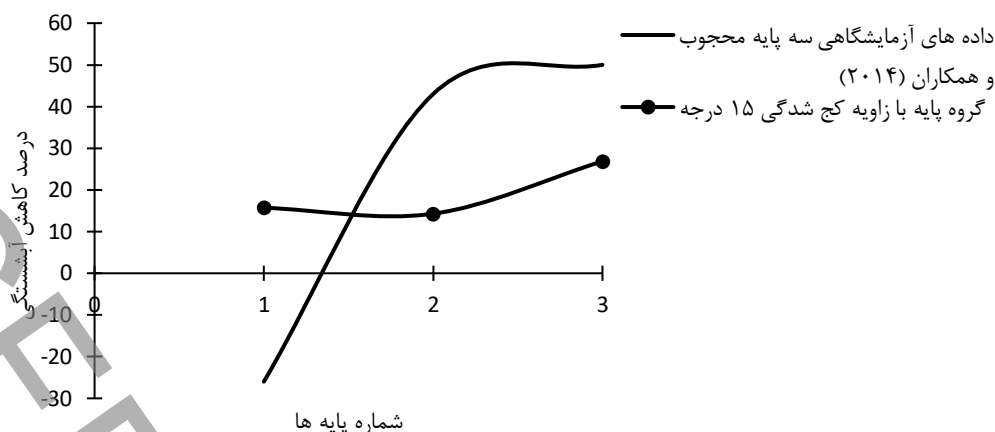
با توجه به شرایط آزمایشگاهی، با ثابت در نظر گرفتن بعضی از پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایه پل رابطه 8 به صورت رابطه 9 ساده می‌شود.

$$\frac{d_s}{b} = f_2\left(\frac{d}{b}, \theta\right) \quad (9)$$

۳- نتایج و بحث

برای محاسبه اختلاف درصد کاهش آبشستگی در گروه پایه از رابطه $(\frac{V_{محاسباتی} - V_{مشاهداتی}}{V_{مشاهداتی}} \times 100)$ استفاده شده است. نتایج آن با استفاده از روش‌های کاهش آبشستگی از جمله شمع حفاظتی و طوق در ادامه بررسی شده است.

برای مقایسه نتایج تحقیق حاضر از داده‌های آزمایشگاهی محجوب و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. در شکل ۳ محجوب و همکاران (۲۰۱۴) درصد کاهش آبشستگی برای سه پایه قائم نسبت به تک پایه را به ترتیب در جلوی پایه اول افزایش ۲۶ درصدی، پایه دوم کاهش ۴۳ درصدی و پایه سوم کاهش ۵۰ درصدی نشان دادند. در این تحقیق برای سه پایه با زاویه کج شدگی ۱۵ درجه درصد کاهش آبشستگی در جلوی پایه‌ها به ترتیب ۱۵/۷، ۱۴/۳ و ۲۶/۹ می‌باشد. با کج شدگی پایه عمق آبشستگی در جلوی پایه اول، دوم و سوم کاهش یافته است.



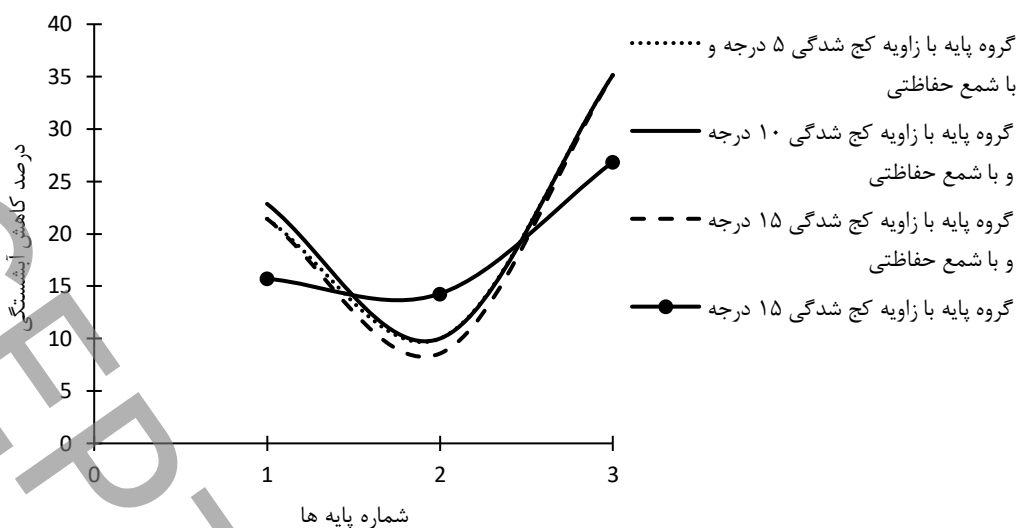
شکل ۳. مقایسه درصد کاهش آبستگی تحقیق حاضر و محجوب و همکاران (۲۰۱۴)

Fig. 3. Comparison of the scour reduction percentage for present research and Mahjoob et al. (2014)

تأثیر استفاده از شمع حفاظتی در کاهش آبستگی گروه پایه کج

در شکل ۴ تأثیر شمع حفاظتی و زوایای کج شدگی پایه در کاهش آبستگی موضعی در جلوی گروه پایه کج سه تایی با زوایای $\theta=5, 10, 15$ درجه در شرایط آب زلال با $\frac{u}{u_c} = 0.9$ در جهت جریان آب برای شرایط $d=3b$ و با حضور شمع به فاصله $s=2b$ نشان داده شده است. در این تحقیق نیز درصد کاهش آبستگی در جلوی پایه کج اول با زاویه کج شدگی 15° درجه در شرایط سه پایه $15/71$ درصد به دست آمده است.

نمودارهای شکل ۴ نشان می‌دهد که در شرایط پایه کج با زاویه $\theta=10^\circ$ بیشترین کاهش آبستگی برای گروه پایه کج سه تایی نسبت به زوایای $5, 15$ درجه مشاهده می‌گردد. در صورتی که به ازای زاویه $\theta=15^\circ$ درجه کمترین کاهش آبستگی نسبت به زوایای دیگر بدست آمد. با مقایسه شمع در کاهش آبستگی می‌توان استنباط کرد که این شمع‌ها خودشان در معرض آبستگی قرار می‌گیرند و با تغییر الگوی جریان و انتقال رسوب از آبستگی پایه‌ها محافظت می‌کنند. بطوری که تأثیر شمع در کاهش آبستگی پایه اول و پایه کج دوم بیشتر بوده و بر آبستگی جلوی پایه قائم تأثیر کمتری داشته است. با قرارگیری شمع حفاظتی در جلوی گروه پایه کج، تأثیر زاویه در کاهش آبستگی کمتر شده و اختلاف درصد کاهش آبستگی برای پایه کج اول و کج دوم برای زاویه 5 تا 15° درجه صفر بوده و در پایه قائم $1/4$ درصد کاهش آبستگی داشته است.



شکل ۴. درصد کاهش آبشستگی برای گروه پایه کج با فاصله بین پایه‌های 3b با زوایای مختلف کج‌شدگی و با وجود شمع حفاظتی در

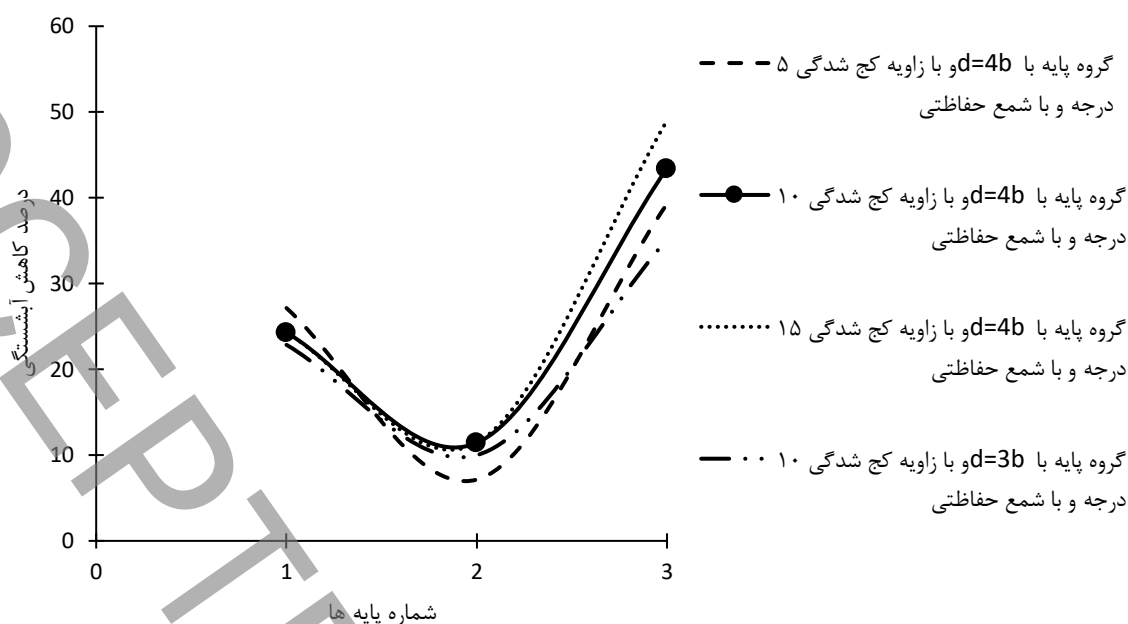
فاصله 2b

Fig. 4. Percentage of scour reduction for inclined pier group with distance between piers of 3b with for different inclination angles with presence of sacrificial pile with distance of 2b

در شکل ۵ تأثیر شمع حفاظتی و زوایای کج‌شدگی پایه در کاهش آبشستگی موضعی در جلوی گروه پایه کج سه تایی در شرایط آب زلال با $\frac{u}{u_c} = 0.9$ در جهت جریان آب برای زوایای $\theta = 5, 10, 15$ نشان داده شده است. درصد کاهش آبشستگی در این تحقیق برای پایه کج سه تایی با زاویه ۵ درجه در جلوی پایه اول و پایه قائم و پایه دوم به ترتیب ۲۷/۱۴، ۱۱/۴۳ و ۳۹/۲۹ درصد به دست آمده است. در تحقیق ونگ و همکاران (۲۰۱۷) درصد کاهش آبشستگی برای شرایط تک پایه با وجود شمع حفاظتی در جلوی پایه ۲۰/۹ درصد گزارش شده است. در شرایط دو پایه با وجود شمع حفاظتی در جلوی پایه اول درصد کاهش آبشستگی در جلوی پایه اول و دوم به ترتیب ۳۳/۳ و ۴۰/۷ درصد به دست آمده است.

همان‌طور که از شکل ۵ استنباط می‌شود گروه پایه با زوایای $\theta = 5, 10, 15$ درجه و $d = 4b$ در پایه قائم کاهش آبشستگی یکسانی را نشان می‌دهند. در شرایط $\theta = 10, d = 4b$ درجه شمع حفاظتی با انتقال رسوب به قسمت جلو و فضای بین پایه‌ها نسبت به $\theta = 10, d = 3b$ درجه، تأثیر بیشتری در کاهش آبشستگی در هر سه پایه داشته است. برای گروه پایه با $d = 4b, \theta = 5, s = 2b$ کاهش آبشستگی در پایه کج اول بیشتر بوده است ولی برای پایه قائم کاهش کمتری داشته است.

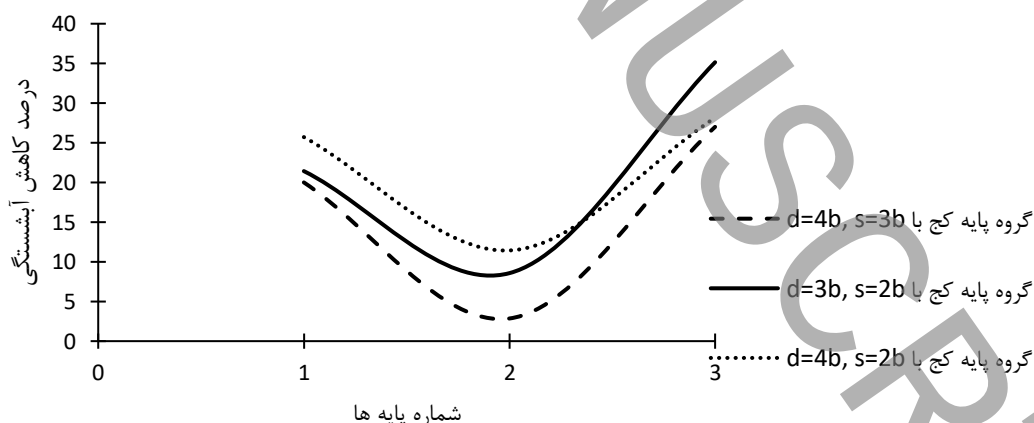
برای گروه پایه کج با فواصل $d = 4b$ تغییر زاویه کج‌شدگی از ۵ به ۱۵ درجه موجب افزایش ۱/۴ و ۱۱/۱ درصدی آبشستگی به ترتیب برای پایه‌های کج اول و دوم شده و کاهش آبشستگی ۴/۳ درصدی در پایه قائم شده است.



شکل ۵. درصد کاهش آبشستگی برای گروه پایه کج با وجود شمع حفاظتی و با زوایای مختلف کج شدگی

Fig. 5. Percentage of scour reduction for inclined pier group with sacrificial pile and with different angle of inclination

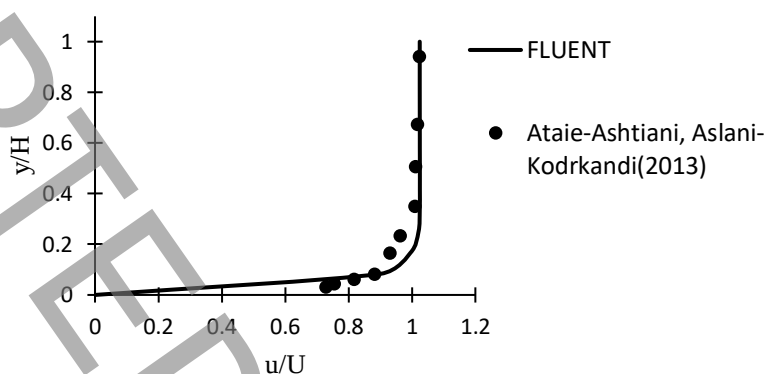
تأثیر تغییر فاصله بین شمع حفاظتی و گروه پایه کج با زاویه $\theta=15^\circ$ درجه برای فاصله‌های $d=3b, 4b$ و $s=2b, 3b$ در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله شمع حفاظتی تأثیر پدیده تقویتی کاهش می‌یابد. اثر پدیده محافظت در صورتی اتفاق می‌افتد که رسوبات اطراف پایه جلویی در جلوی پایه عقبی جمع شوند. شکل ۵ بیانگر آن است که برای شمع حفاظتی قرار گرفته با فاصله $s=2b$ به ازای $d=4b$ ، شمع در جلوی پایه کج اول در مقایسه با فاصله‌های $s=2b, 3b$ موجب کاهش آبشستگی موضعی بیشتری می‌گردد. همچنین با در نظر گرفتن فاصله یکسان شمع حفاظتی ($s=b$) و گروه پایه کج با تغییر فاصله بین پایه‌ها برای فاصله بین پایه ای $4b$ در اثر پدیده محافظت و انتقال رسوب به جلوی پایه‌ها کاهش آبشستگی بیشتری در هر سه پایه مشاهده می‌شود.



شکل ۶. تأثیر تغییرات فاصله بین شمع حفاظتی و گروه پایه کج بر درصد کاهش آبشستگی اطراف پایه ها

Fig. 6. the effect of the sacrificial pile and inclined pier group distance changes on the scour reduction percentage

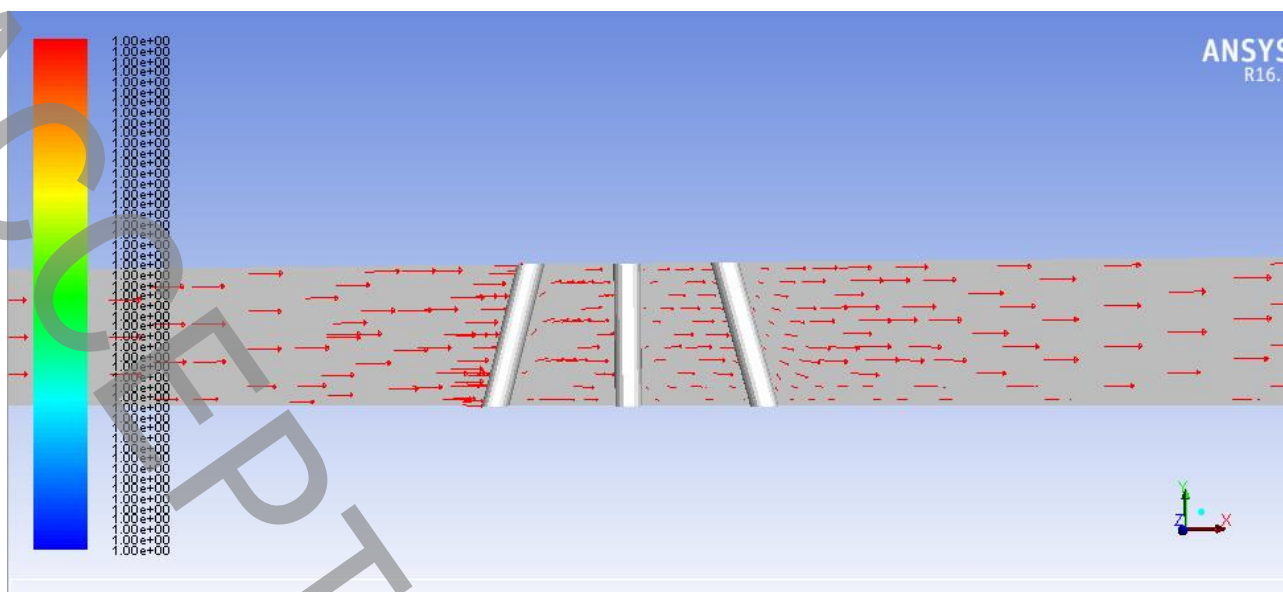
برای ارزیابی نتایج توزیع سرعت بدست آمده از مدل عددی از داده‌های عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۲۰۱۳) استفاده گردید. در این حالت مطابق شرایط هیدرولیکی این تحقیق مدلی عددی شبیه سازی شد که در شکل ۷ نتایج توزیع سرعت مدل عددی با داده های آزمایشگاهی به صورت بی بعد مقایسه شده است. محور افقی نسبت سرعت در عمق های مختلف جریان به سرعت متوسط (u/U) و محور قائم نسبت فاصله از سطح بستر به عمق جریان (y/H) است. همان طور که در این شکل دیده می شود هر دو منحنی دارای توزیع سرعت یکسانی بوده و اختلاف سرعت کمی در نزدیکی بستر دیده می شود و در نواحی دیگر تطابق خوبی بین داده های توزیع سرعت وجود دارد. مقدار خطای نسبی سرعت جریان در حدود ۷ درصد بدست آمد.



شکل ۷. مقایسه توزیع سرعت مدل عددی و داده های آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۲۰۱۳)

Fig. 7. Comparison of the velocity distribution of numerical model and Ataie-Ashtiani and Aslani-kordkandi (2013) data

شکل ۸ بردارهای توزیع سرعت در حالت سه پایه با فواصل $d=5b$ را نشان می دهد. بردارهای سرعت بعد از برخورد با پایه در پشت پایه اول به سمت بالا حرکت کرده و در پشت پایه دوم به سمت بستر حرکت می کنند. در جلو و پشت پایه سوم حرکت بردارهای سرعت به سمت بستر بوده است.

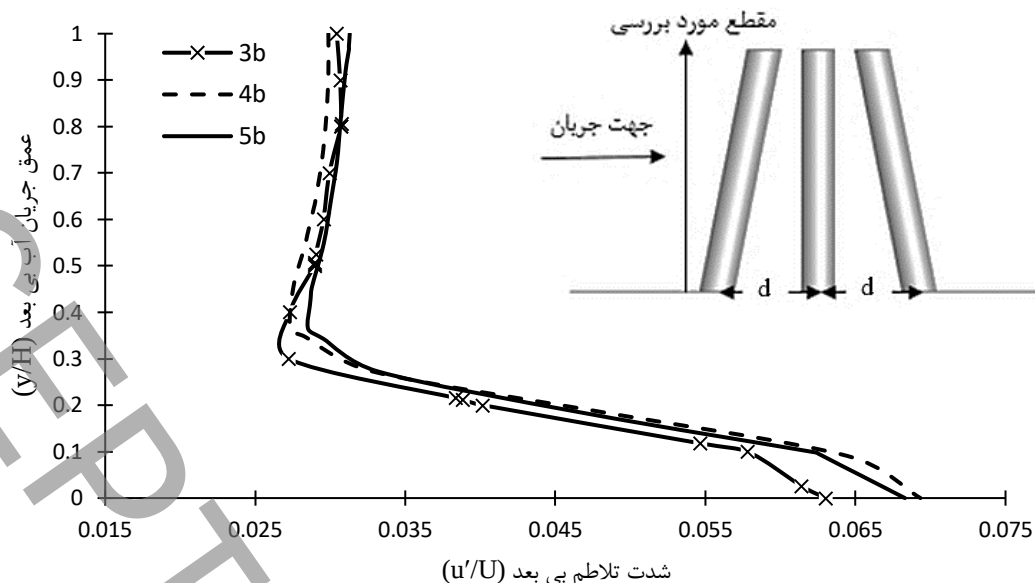


شکل ۸- بردارهای توزیع سرعت اطراف سه پایه کج

Fig. 8. Vector of velocity distribution around inclined piers

تأثیر استفاده از شمع حفاظتی روی شدت تلاطم در مدل عددی

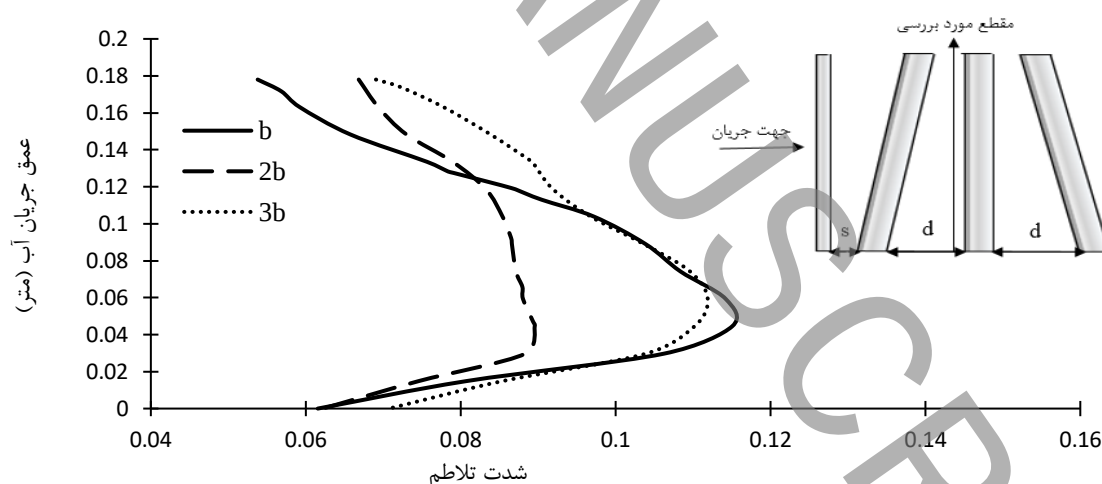
در شکل ۹ منحنی‌های شدت تلاطم برای گروه پایه با فواصل $d=3b, 4b, 5b$ بر روی سی شده است. مقطع مورد بررسی برای توزیع شدت تلاطم در جلوی پایه کج اول و به فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز پایه کج اول (شکل ۹) در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند بیشترین شدت تلاطم در روی بستر کانال بوده و با فاصله گرفتن از بستر مقدار آن کاهش یافته و به کمترین مقدار شدت تلاطم رسیده است سپس به تدریج تا سطح آب افزایش یافته است. برای فواصل مختلف بین پایه‌ها تفاوت زیادی بین نمودارها مشاهده نمی‌شود و به دلیل اینکه پایه اول تحت تأثیر پدیده تقویت پایه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرد در نتیجه منحنی‌های شدت تلاطم به یکدیگر نزدیک است.



شکل ۹- مقایسه منحنی‌های توزیع شدت تلاطم در بالادست پایه کج اول برای فواصل مختلف بین پایه‌ها در گروه پایه سه تایی کج

Fig. 9. Comparison of turbulence intensity distribution in upstream of first inclined pier for different distance between piers in inclined pier group

در شکل ۱۰ توزیع شدت تلاطم در عمق جریان برای پایه قائم در گروه پایه کج در شرایط وجود شمع حفاظتی به فواصل $s=b, 2b, 3b$ نشان داده شده است. فواصل بین پایه‌ها ثابت ($d=3b$) در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که شدت تلاطم در عمق جریان $3b$ در حالت حضور شمع حفاظتی با فاصله $2b$ از پایه اول نسبت به فاصله‌های b و $3b$ از مقدار 0.11 به 0.89 کاهش یافته است.



شکل ۱۰- مقایسه منحنی توزیع شدت تلاطم در حالت حضور شمع حفاظتی با فواصل مختلف در بالادست پایه کج اول

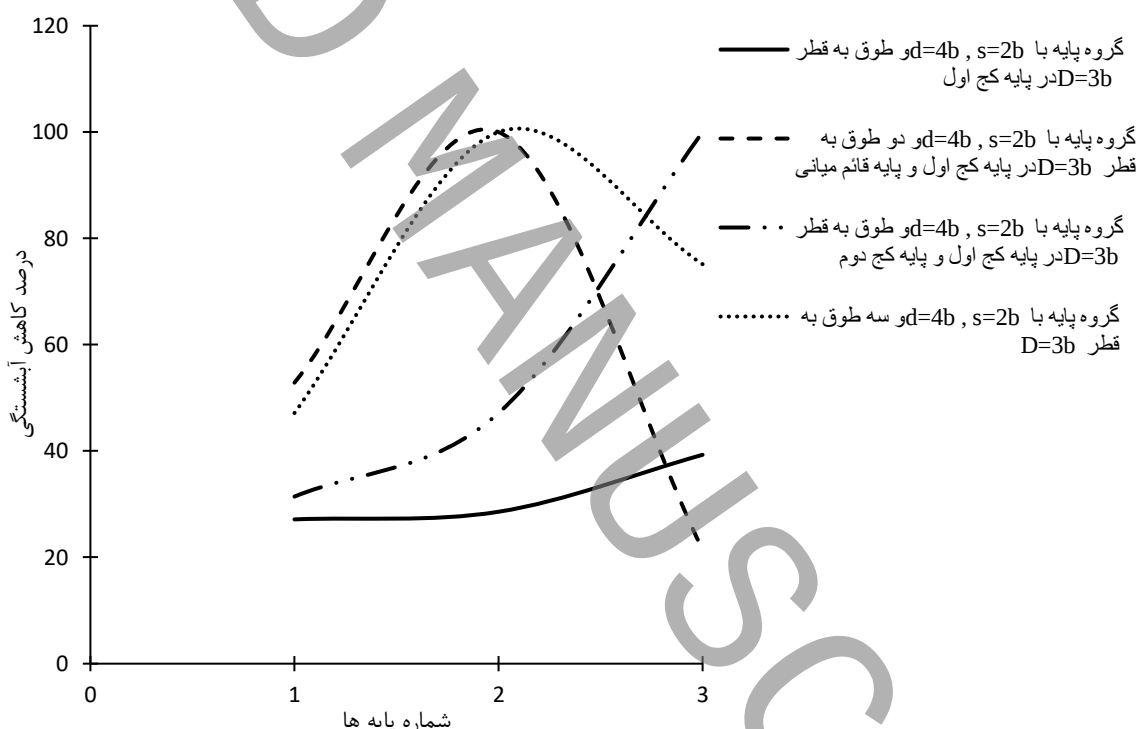
Fig. 10. Comparison of turbulence intensity distribution in presence sacrificial pile with different distance in upstream of first inclined pier

استفاده از شمع حفاظتی و طوق در کاهش آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه کج

بررسی‌های آزمایشگاهی برای حالت قرار گیری طوق در روی بستر و وجود شمع حفاظتی در جلوی پایه کج اول نشان می‌دهد که شمع حفاظتی الگوی جریان در اطراف پایه‌ها را تغییر داده و در حالت قرارگیری طوق در روی یکی از پایه‌ها مشاهده می‌شود که ابتدا آبشستگی از جلوی شمع حفاظتی شروع شده و سپس به ترتیب در جلوی پایه‌های بعدی بدون طوق آبشستگی ایجاد می‌شود. سپس به ترتیب گرداب برخاستگی پشت طوق پایه انتهایی تا پایه ابتدایی فعال شده و ما سه‌های اطراف را پراکنده می‌کند. بعد با گسترش حفره آبشستگی در پشت شمع، جلوی طوق پایه اول عمق آبشستگی مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۱ درصد کاهش آبشستگی موضعی در گروه پایه کج با $\theta=15^\circ$, $s=2b$, $d=4b$ درجه و استفاده از طوق به قطر $3b$ در تک پایه‌ها نشان داده شده است. بررسی نمودارها نشان می‌دهد که در حالت پایه قائم با طوق، بیشترین کاهش آبشستگی دیده می‌شود. در گروه پایه کج طوق دار در پایه‌های کج اول و دوم کاهش ۱۰۰ درصدی آبشستگی در اطراف پایه کج دوم مشاهده می‌گردد. برای گروه پایه کج طوق دار در هر سه پایه نسبت به بقیه حالت‌ها کاهش آبشستگی بیشتری وجود دارد. بنابراین طوق مانند یک سپر محافظ با جلوگیری از برخورد جریان رو به پایین به ذرات بستر، باعث کاهش آبشستگی بیشتری شده است. کج شدن پایه‌ها نیز در کاهش قدرت جریان‌های رو به پایین مؤثر بوده است.

زرانی و همکاران (۲۰۰۶) کاهش آبشستگی را برای دو پایه هم‌امتداد با استفاده از طوق به قطر ۳ برابر قطر پایه در جلوی پایه اول ۳۰ درصد به دست آوردند. در این تحقیق نیز در حالت پایه اول طوق دار درصد کاهش آبشستگی ۲۷/۱۴ درصد بوده است.



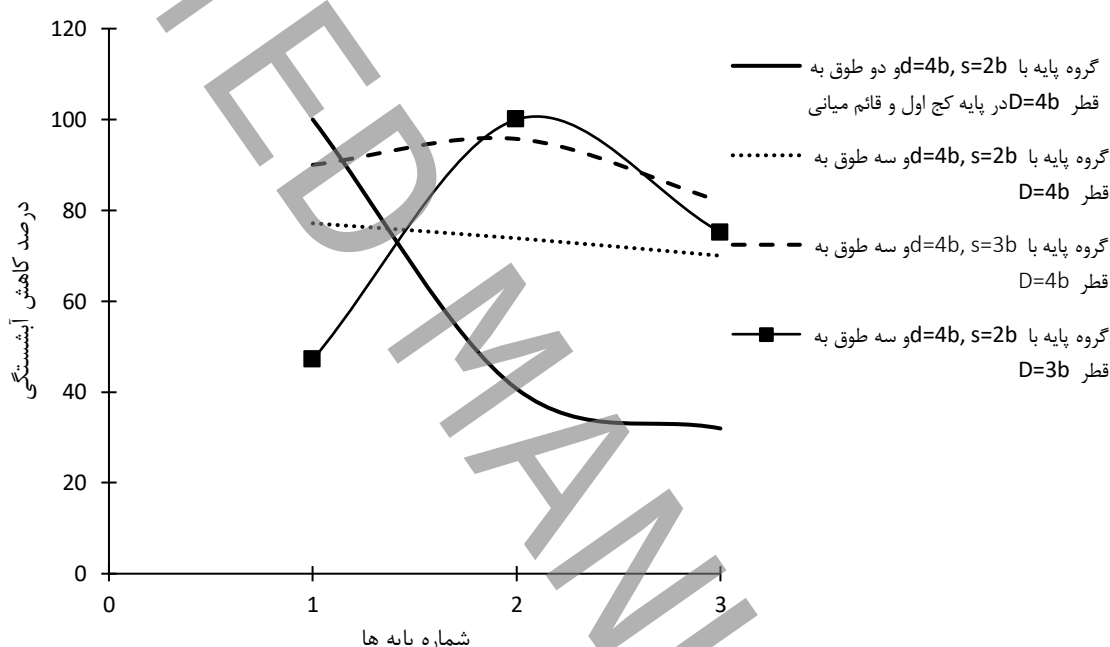
شکل ۱۱. تاثیر کاربرد توأم طوق به قطر $3b$ و شمع حفاظتی با فاصله $s=2b$ در کاهش آبشستگی موضعی گروه پایه کج

Fig. 11. The effect of application of collar with diameter $3b$ and sacrificial pile with distance of $s=2b$ in reduction of local scour of inclined pier group

در شکل ۱۲ درصد کاهش آبشستگی برای گروه پایه با شرایط $s=2b$, $3b$ و $d=4b$ با کاربرد طوق به قطر $4b$ در هر سه پایه نشان داده شده است. از این شکل می‌توان استنباط نمود که استفاده از طوق در پایه کج اول و پایه قائم موجب کاهش آبشستگی ۱۰۰ درصدی در اطراف پایه کج اول شده است.

نتایج استفاده از سه طوق به قطر $4b$ برای گروه پایه نشان می‌دهد که وجود شمع حفاظتی در جلوی پایه کج اول با فواصل $2b$ و $3b$ تاثیر متفاوتی دارد به طوری که در شرایط شمع حفاظتی با فاصله $3b$ نسبت به فاصله $2b$ عمق آبشستگی در جلوی پایه‌ها کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. کاهش آبشستگی در پایه‌ها به ترتیب ۹۵، ۹۰ و ۸۲ درصد می‌باشد.

با مقایسه نمودار کاهش آبشستگی می‌توان استنباط نمود که برای گروه پایه کج $d=4b$, $s=2b$ و سه طوق با قطرهای مختلف $3b$ و $4b$ در مقایسه با شرایط $d=4b$, $s=2b$ و دو طوق به قطر $4b$ (در پایه‌های دوم و سوم) آبشستگی کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. استفاده از طوق‌ها موجب می‌شود خطوط جریان اطراف پایه انحراف بیشتری یافته و قدرت گرداب‌های نعل‌اسبی و برخاستگی کاهش یافته و از برخورد جریان‌های رو به پایین با بستر جلوگیری می‌شود. بنابراین در کاهش آبشستگی موضعی عملکرد بهتری داشته است.

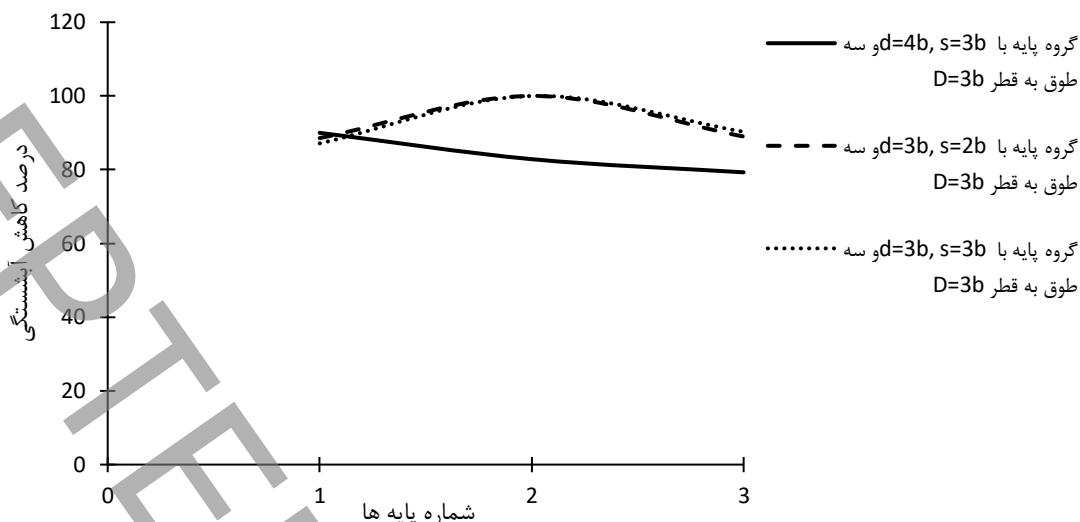


شکل ۱۲. تاثیر کاربرد توأم طوق و شمع حفاظتی با فواصل مختلف در کاهش آبشستگی موضعی گروه پایه کج

Fig. 12. The effect of application of collar and sacrificial pile with different distance on reduction of local scour of inclined pier group

در شکل ۱۳ درصد کاهش آبشستگی برای هر گروه پایه کج با فواصل مختلف پایه‌ها با وجود طوق ($D=3b$) و شمع با فاصله‌های مختلف $s=2b$, $3b$ از پایه کج اول نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای گروه پایه کج با زاویه کج‌شدگی ۱۵ درجه و فاصله پایه‌های $d=3b$ و سه طوق به قطر $3b$ با تغییر فاصله شمع حفاظتی از پایه کج اول تغییر محسوسی در عمق آبشستگی مشاهده نشده است و در هر سه پایه، کاهش آبشستگی برای فواصل $2b$ و $3b$ یکسان به دست آمده است. همچنین با مقایسه نمودارهای کاهش آبشستگی برای شرایط آزمایش‌هایی که فاصله پایه‌های پل متغیر بوده ($d=3b$, $4b$) ولی اندازه طوق و فاصله شمع حفاظتی تا جلوی پایه کج اول ثابت است ($D=3b$, $s=3b$) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها ($d=4b$) تأثیر متقابل پایه‌ها کاهش یافته

در نتیجه عمق آبشستگی در جلوی پایه قائم و پایه کج دوم به ترتیب ۱۷/۱۴ و ۱۱ درصد افزایش می یابد ولی مقدار آبشستگی اطراف پایه کج اول یکسان است.



شکل ۱۳. تاثیر کاربرد توأم طوق به قطر 3b و شمع حفاظتی با فواصل 3b, s=2b در کاهش آبشستگی موضعی گروه پایه کج با فواصل 3b, 4b

Fig. 13. The effect of application of collar with diameter 3b and sacrificial pile with s=2b, 3b on reduction of local scour inclined pier group with distance of d=3b, 4b

۴- نتیجه گیری

- استفاده از شمع حفاظتی در بالادست گروه پایه کج با فاصله d=3b نشان می دهد که در پایه کج با زاویه $\theta=10^\circ$ درجه بیشترین کاهش آبشستگی برای گروه پایه کج سه تایی نسبت به زوایای 5, 15 درجه مشاهده می گردد. در صورتی که به ازای زاویه $\theta=15^\circ$ درجه کمترین کاهش آبشستگی نسبت به زوایای دیگر به دست آمد. با مقایسه تأثیر وجود یا عدم وجود شمع در کاهش آبشستگی می توان استنباط کرد که تأثیر شمع در کاهش آبشستگی پایه اول و پایه کج دوم بیشتر بوده و بر آبشستگی در بالادست پایه قائم تأثیر کمتری داشته است. در شرایط گروه پایه بدون شمع حفاظتی کاهش بیشتری در جلوی پایه قائم وجود دارد.
- در شرایط پایه کج با زاویه $\theta=10^\circ$ و با فاصله بین پایه ای d=4b شمع حفاظتی با انحراف جریان و کاهش سرعت جریان و کم کردن پتانسیل فرساینده گی جریان نسبت به شرایط پایه کج با زاویه $\theta=10^\circ$, d=3b تأثیر بیشتری در کاهش آبشستگی در هر سه پایه داشته است.
- در شرایط گروه پایه کج با فاصله d=4b, $\theta=15^\circ$ درجه، شمع حفاظتی قرار گرفته با فاصله s=2b (بالادست پایه کج اول) نسبت به حضور شمع حفاظتی با فاصله s=3b کاهش آبشستگی موضعی بیشتری بدست آمد.
- در گروه پایه کج شامل طوق در هر سه پایه به ازای زاویه $\theta=15^\circ$ درجه و فواصل d=4b, s=2b کاهش آبشستگی بیشتری نسبت به بقیه حالت ها وجود دارد.
- نتایج استفاده از سه طوق به قطر 4b در گروه پایه با فواصل d=4b نشان می دهد که وجود شمع حفاظتی با فاصله s=3b نسبت به حالت s=2b، عمق آبشستگی جلوی پایه ها کاهش بیشتری وجود دارد.

- نتایج مدل عددی نشان داد برای فواصل مختلف بین پایه‌ها تفاوت زیادی بین نمودارهای شدت تلاطم نسبت به عمق جریان (در فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز پایه کج اول) مشاهده نمی‌شود. استفاده از گروه پایه کج با فواصل بین پایه‌های $d=3b$ و شمع حفاظتی قرار گرفته در فاصله $s=2b$ از پایه نسبت به فاصله‌های $s=b$, $3b$ شدت تلاطم کمتری را نشان می‌دهد.

منابع

- [1] H. Arvanaghi, A. Hosseinzadeh-Dalir, A. Fakherifard, Effect of side walls of the laboratory flume on scour depth around bridge piers, *Journal of agricultural science*, 16(2) (2006) 1-11. (In Persian)
- [2] H. Arvanaghi, An experimental study of scour reduction around a bridge pier with rectangular collar and simulation of flow pattern around it by turbulence models. Thesis of PhD. Department of Water Engineering, Tabriz University, Iran, 2009. (In Persian)
- [3] B. Ataie-Ashtiani, A. Beheshti, Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups, *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10) (2006) 1100-1104.
- [4] Y. Aghaee-Shalmani, H. Hakimzadeh, Experimental investigation of scour around semi-conical piers under steady current action, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(6) (2015) 717-732.
- [5] B. Ataie-Ashtiani, A. Aslani-Kordkandi, Flow field around single and tandem piers, *Flow, turbulence and combustion*, 90(3) (2013) 471-490.
- [6] N. Azam, M. Ghomeshi, Influence of sacrificial piles on scour reduction of cylindrical bridge pier, *Journal of water and soil science*, 23(3) (2013) 123-134. (In Persian)
- [7] Z. Bozkus, M. Çeşme, Reduction of scouring depth by using inclined piers, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(12) (2010) 1621-1630.
- [8] Z. Bozkus, O. Yildiz, Effects of inclination of bridge piers on scouring depth, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(8) (2004) 827-832.
- [9] W.-Y. Chang, J.-S. Lai, C.-L. Yen, Evolution of scour depth at circular bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9) (2004) 905-913.
- [10] Y. Chiew, B. Melville, Local scour around bridge piers, *Journal of Hydraulic Research*, 25(1) (1987) 15-26.
- [11] A. Fluent, ANSYS fluent theory guide 15.0, ANSYS, Canonsburg, PA, (2013).
- [12] S.S. Hosseini, M. Esmaeili Varaki, R. Fazleola, Experimental investigation of scour around inclined bridge piers group based on piles group, *Journal of water and soil science*, 26(4/2) (2016) 135-147. (In Persian)
- [13] V. Kumar, K.G.R. Raju, N. Vittal, Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars, *Journal of hydraulic engineering*, 125(12) (1999) 1302-1305.
- [14] A. Kassem, Three-dimensional model analysis of pier scour hydraulics: a supplement to experimental and field investigations. World Environmental and Water Resource Congress, (2006) May 21-25, Omaha, Nebraska, United States.
- [15] B. Mahjoob, B. Mohammadnezhad, J. Behmanesh, Numerical modeling of local scouring around group bridge piers and compared with experimental results, *Journal of water and soil*, 28(2) (2014) 267-275.
- [16] B.W. Melville, Y.-M. Chiew, Time scale for local scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1) (1999) 59-65.
- [17] B.W. Melville, A.C. Hadfield, Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(11) (1999) 1221-1224.
- [18] B.W. Melville, Pier and abutment scour: integrated approach, *Journal of hydraulic Engineering*, 123(2) (1997) 125-136.

- [19] S.A.H. Mahmoudi, M. Heidar Pour, Evaluate the performance of the control and reduction of scour protection of bridge piers cylindrical candles, *Journal of engineering & construction management*, 1(3) (2016) 7-11. (In Persian)
- [20] A.J. Raudkivi, R. Ettema, Clear-water scour at cylindrical piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3) (1983) 338-350.
- [21] M. Vaghefi, M. Ghodsian, S. Salimi, The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour, *Sadhana*, 41(1) (2016) 75-86.
- [22] C. Wang, F. Liang, X. Yu, Experimental and numerical investigations on the performance of sacrificial piles in reducing local scour around pile groups, *Natural Hazards*, 85(3) (2017) 1417-1435.
- [23] W. Xiong, C.S. Cai, B. Kong, X. Kong, Cfd simulations and analyses for bridge-scour development using a dynamic-mesh updating technique, *Journal of computing in civil engineering*, 30(1) (2014) 1-11.
- [24] A.R. Zarrati, M.R. Chamani, A. Shafaie, M. Latifi, Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap, *International Journal of Sediment Research*, 25(3) (2010) 313-322.
- [25] A. Zarrati, M. Nazariha, M. Mashahir, Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap, *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2) (2006) 154-162.
- [26] <https://wisconsindot.gov/Pages/doing-bus/eng-consultants/cnslt-rsrcs/strct/bridge-manual-standards.aspx>

Experimental and numerical investigation of scour around inclined pier group with sacrificial pile and collar

Abstract

The scour has been studied in hydraulic science for many years, due to its complexity, it has been the attention of hydraulic scientists. Hydraulic structures situated as an obstacle in front of water flow that changed the flow pattern in their vicinity and causing the local scour around the structure. There are various methods to reduce local scour around the pier. In this research, sacrificial pile and collar were used to reduce the local scour around inclined pier group. The results show that using of the sacrificial pile in front of the inclined pier group, the effect of the inclined pier angle on the reduction of the scour is lower. So that difference between the percentage of scour reduction for the first and second inclined piers in the angle of 5 and 15 degrees is zero and in vertical pier is 1.4%. The use of three collars with a diameter of $4b$ in pier group with the distance of $4b$ between piers and presence of sacrificial pile in front of the first inclined pier in distance of $3b$ compared to $2b$ show a greater scour depth reduction in front of the piers. In the numerical model, the use of inclined pier group with the distance of $3b$ between piers and sacrificial pile with distance of $2b$ shows lower turbulence intensity compared to distances of b and $3b$.

Keywords Collar, Inclination angle of the pier, Inclined pier group, Local scour, Sacrificial pile.