



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

فاطمه جعفری^۱، اکرم عباس‌پور^{۲*}، هادی ارونقی^۱، علی حسین‌زاده دلبر^۱

۱- دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

آب‌شستگی موضعی
زاویه کج شدگی پایه
شمع حفاظتی
طوق
گروه پایه کج

خلاصه: آب‌شستگی سالیان طولانی در علم هیدرولیک مورد مطالعه بوده است، با توجه به شرایط و پیچیدگی های آن، همچنان مورد توجه محققین علم هیدرولیک قرار گرفته است. سازه های 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 می شوند. روش های مختلفی برای کاهش آب‌شستگی موضعی اطراف پایه ها 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 b ۴ در گروه پایه با فاصله بین پایه های b ۴ و وجود شمع حفاظتی در جلوی پایه کج اول به فاصله b ۳ نسبت به فاصله b ۲ به ترتیب کاهش ۱۲/۸۶، ۲۱/۸۵ و ۱۲ درصدی عمق آب‌شستگی در جلوی پایه ها را نشان می دهد. نتایج مدل عددی نشان می دهد که استفاده از گروه پایه کج با فاصله بین پایه های b ۳ و با حضور شمع حفاظتی به فاصله b ۲ از پایه اول نسبت به فاصله های b و b ۳ شدت تلاطم از مقدار ۰/۰۸۹ به مقدار ۰/۱۱ رسیده است.

۱- مقدمه

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 پایه

پل‌ها افزایش یافته است. استفاده از گروه پایه به طور قابل توجهی هزینه های 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 پیش بینی عمق آب‌شستگی مشکل است [۳]. بوزکوس و چشمه (۲۰۱۰) به طور آزمایشگاهی کاهش عمق آب‌شستگی موضعی در اطراف دو پایه کج را به قطر پایه های (b) ۲۵، ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر مورد مطالعه قرار دادند. عمق جریان آب (d_0) در کانال مختلف بوده است. زوایای کج شدگی پایه در راستای عمودی (β) ۰، 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 کج شدگی پایه کاهش می‌یابد. به طوریکه 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 کج شدگی 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

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: akabaspour@yahoo.com



داده های بوزکوس و بیلدیز (۲۰۰۴) رابطه ۱ را برای تعیین عمق آبشستگی در جلوی پایه کج با دانه بندی 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 متمم زاویه پایه پل بر حسب رادیان می‌باشد.

واقفی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر زوایای کج شدگی ۷، ۱۴ و ۲۱ درجه را با کج شدگی 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 کج شدگی جریان منجر به کاهش ابعاد پشته رسوبی و حفرة آبشستگی گردید. با افزایش سرعت نسبی، عمق حفرة 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.

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

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

آقایی شلمانی و حکیم زاده (۲۰۱۵) آبشستگی اطراف پایه های مخروطی شکل را تحت شرایط آب زلال بررسی کردند. پایه ها با زاویه های 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 پایه های مخروطی شکل با زاویه شیب ۱۵ درجه در پایین دست پایه ۵۳ درصد به دست آمد.

زرانی و همکاران (۲۰۱۰) برای کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل از ترکیب طوق و ریپر 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 b ۲ و b ۳ به ترتیب ۲۰ و ۲۶ درصد به دست آمد. همچنین استفاده از طوق اندازه لایه ریپر را در جلو و کناره های پایه کاهش می دهد. به طوریکه با طوق به اندازه b ۳ استفاده از لایه ریپر کاملاً حذف می شود. محدوده مورد نیاز برای پوشاندن با لایه ریپر در سه حالت بدون طوق، با طوق به قطر b ۲ و b ۳ به ترتیب b^2 ۱۸/۶۴، b^2 ۱۲/۷۶ و b^2 ۷/۲۹۹ می‌باشد. این نتایج نشان داد که با فرض ضخامت ثابت لایه ریپر، حجم لایه ریپر برای طوق به قطر b ۲ و b ۳ به ترتیب ۳۱ و ۵۷ درصد کمتر از حالت بدون طوق می‌باشد. همچنین زرانی و همکاران (۲۰۰۶) کاهش آبشستگی در دو پایه را با استفاده از طوق و ریپر بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که برای دو پایه هم امتداد 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 2×2 و 2×3 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 شمع ها از 2×2 به 2×3 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 شمع ها، تأثیر قابل ملاحظه ای بر عمق آبشستگی وجود نداشت. بررسی تاثیر 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 شمع ها از ۰/۶ به ۰/۹ و در آرایش های شمع 2×2 و 2×3 ، عمق آبشستگی ۵ و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

ملویل و هادفیلد (۱۹۹۹) برای کاهش آبشستگی موضعی پایه پل از شمع های حفاظتی استفاده کردند. شمع های قرار گرفته در بالادست پایه با آرایش های مختلف و با زاویه نسبت به جریان بودند. آرایش مثلثی با قرارگیری نوک آن در بالادست جریان بهترین ترکیب برای قرارگیری شمع است. در حالت کلی، شمع ها 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 شمع های حفاظتی در کاهش آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پرداختند. در حالت

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 سانتیمتر 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 میباید. بر اساس استاندارد Wisconsin زاویه کج شدگی پایه پل نسبت به محور عمودی کمتر از ۱۵ درجه در نظر گرفته میشود. در این تحقیق زوایای کج شدگی پایه اول و سوم (θ) ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه بوده و فاصله بین پایه ها (d) ۳ و ۴ برابر قطر پایه است.

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 یافته های 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 می یابد. 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 $S=2b, 3b$ (b: قطر پایه) بررسی گردید. برای کاهش آبشستگی تأثیر همزمان طوق و شمع حفاظتی در نظر گرفته شد. به طوریکه با تغییر فواصل بین پایه ها و فاصله شمع تا پایه و قرارگیری طوق روی تک تک پایه ها به صورت گروهی و تکی، آزمایش هایی در آزمایشگاه انجام شد.

برای ارزیابی عمق آبشستگی به دست آمده در آزمایش ها از رابطه ملویل (۱۹۹۷) برای محاسبه عمق آبشستگی استفاده شد. برای از بین رفتن تأثیر دیواره های 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 یافته های 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 آزمایش ها برای رسوبات ماسه ای با کاهش تدریجی عمق جریان و ثابت بودن دبی به

کلی نتایج آرایش های مختلف قرار گیری شمع نشان داد که استفاده از شمع حفاظتی زمان مورد نیاز برای رسیدن به تعادل را کاهش می دهد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی نیز نشان می دهد 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 میباید.

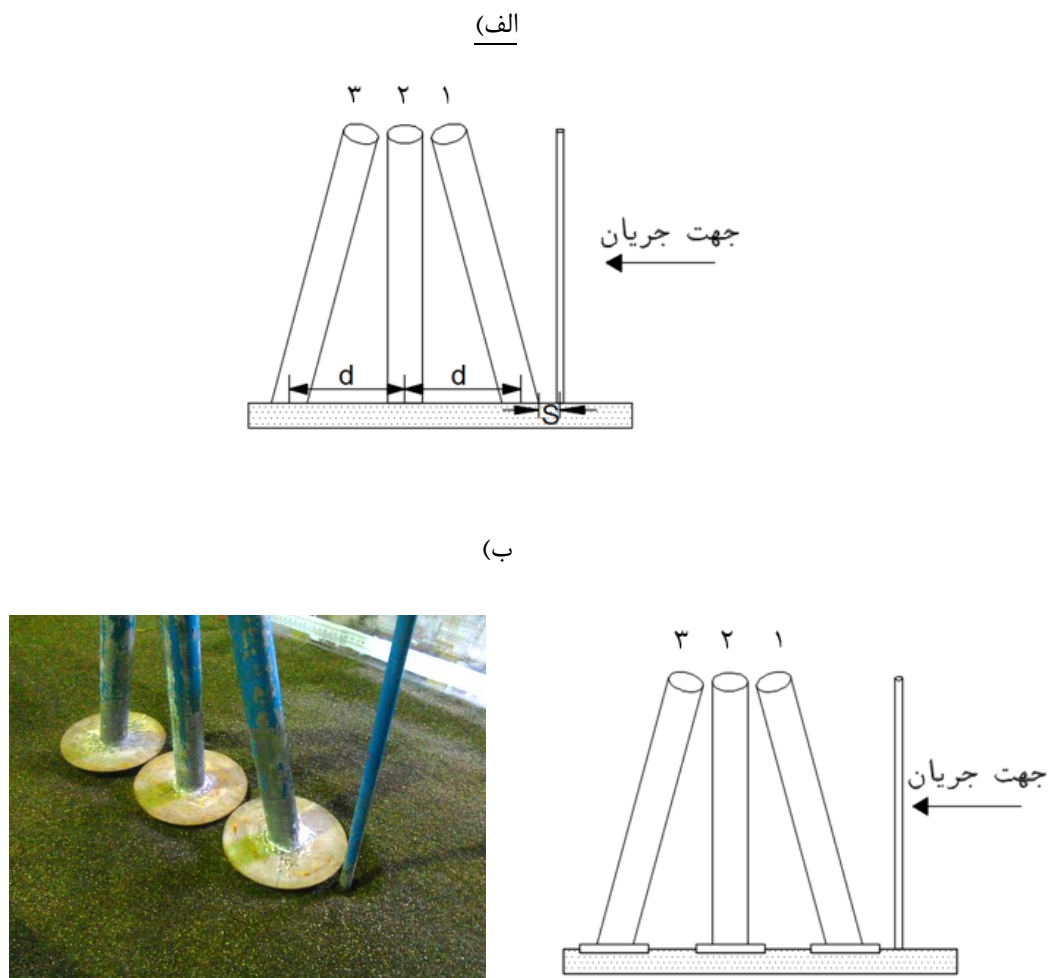
محمودی و حیدرپور (۲۰۱۶) برای کاهش آبشستگی پایه های پل از شمع های حفاظتی استفاده کردند. شمع های حفاظتی با آرایش مثلثی و تعداد آن ۵ عدد بود. فاصله افقی شمع ها از یکدیگر ۰/۷، ۱ و ۱/۳ برابر قطر پایه و قطر پایه ۳ سانتیمتر در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که کاهش زاویه و فاصله افقی شمع ها راندمان شمع را افزایش 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 روش ها 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 پی باکینگهام به کمیت های 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 روش ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

آزمایش ها 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 اندازه گیری شده است. ارتفاع آب توسط عمق سنج تعبیه شده روی کانال با دقت ۰/۱ میلیمتر 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 میلیمتر باشد. در این تحقیق اندازه متوسط ذرات ۰/۸ میلیمتر 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



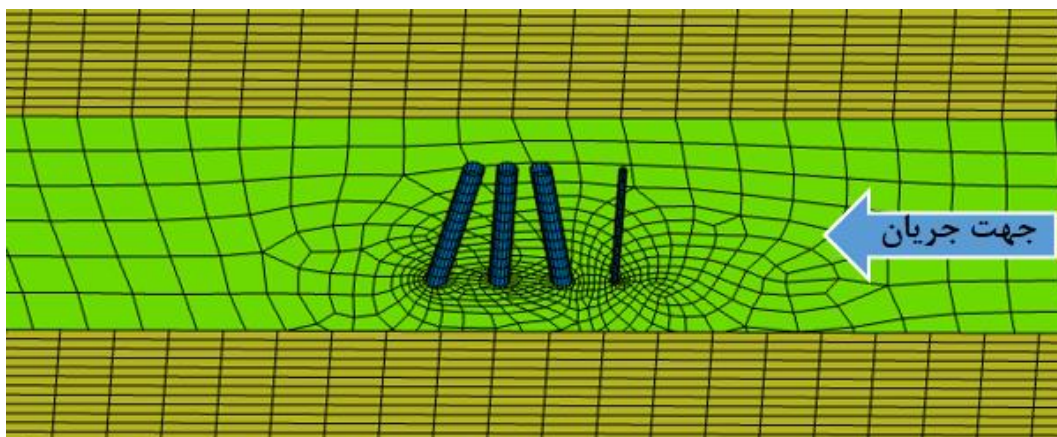
شکل ۱. الف) تصویر آزمایشگاهی گروه پایه کج با شمع حفاظتی ب) گروه پایه کج با طوق و شمع حفاظتی

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

جدول ۱. شرایط هیدرولیکی جریان برای بررسی آب شستگی 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 $(\frac{m}{s})$	عمق آب (m)	دبی جریان $(\frac{lit}{s})$	مدل آزمایشگاهی
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



شکل ۲. شبکه بندی اطراف گروه پایه کج همراه با شمع حفاظتی

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

۲-۲- مدل عددی

برای شبیه سازی الگوی جریان در گروه پایه کج همراه با شمع از انسیس فلونت استفاده گردید. هندسه کانال در Design Modeler نرم افزار انسیس طراحی شد و برای مش بندی از خود مش^۱ و رک بنج استفاده شده و سپس شرایط مرزی برای آن تعریف گردید و بعد فایل شبکه بندی به فلونت انتقال یافت. مدله ای شبیه سازی 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، دیواره ها، کف و پایه پل از نوع Wall و برای صفحه بالایی از نوع Symmetry می باشد. در شکل ۲ شبکه بندی اطراف سه پایه کج همراه با شمع با زاویه کج شدگی ۱۵ درجه نشان داده شده است. تعداد مش ایجاد شده در مدل های شبکه بندی شده ۲۰۰۰۰ می باشد. برای کاهش زمان محاسبات و در نظر گرفتن نتایج، تعداد مش ۱۳۰۰۰ در نظر گرفته شد.

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:

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

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

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

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

با توجه به شرایط آزمایشگاهی، با ثابت در نظر گرفتن بعضی از پارامترهای موثر بر آب‌شستگی پایه پل رابطه ۸ به صورت رابطه ۹ 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 $(100 \times \frac{V_{\text{محاسباتی}} - V_{\text{مشاهداتی}}}{V_{\text{مشاهداتی}}})$ 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 محبوب و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. در شکل ۳ محبوب 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.

۳-۱- تأثیر استفاده از شمع حفاظتی در کاهش آب‌شستگی گروه پایه کج

در شکل ۴ تأثیر شمع حفاظتی و زوایای کج شدگی پایه در کاهش آب‌شستگی موضعی در جلوی گروه پایه کج سه تایی با زوایای $\theta=5^\circ$ و 10° و 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 آب‌شستگی در جلوی پایه کج اول با زاویه کج شدگی ۱۵ درجه در شرایط سه پایه ۱۵/۷۱ درصد به دست آمده است.

نمودارهای شکل ۴ نشان میدهد که در شرایط پایه کج با زاویه $\theta=10^\circ$ بیشترین کاهش آب‌شستگی برای گروه پایه کج سه تایی نسبت به زوایای $\theta=5^\circ$ ، ۱۵ درجه مشاهده می‌گردد. در صورتیکه به ازای زاویه $\theta=15^\circ$ درجه کمترین کاهش آب‌شستگی نسبت به زوایای دیگر به دست آمد. با مقایسه شمع در کاهش آب‌شستگی میتوان استنباط کرد که این شمع‌ها خودشان در معرض آب‌شستگی قرار می‌گیرند و با تغییر الگوی جریان و انتقال رسوب از آب‌شستگی پایه‌ها محافظت می‌کنند. به طوری که تأثیر شمع در کاهش آب‌شستگی پایه کج اول و پایه کج دوم بیشتر بوده و بر آب‌شستگی جلوی پایه قائم تأثیر کمتری داشته است. با قرارگیری شمع حفاظتی در جلوی گروه پایه کج، تأثیر زاویه در کاهش آب‌شستگی کمتر شده و اختلاف درصد کاهش آب‌شستگی برای

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

۳-۲- 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 فلونت شدت تلاطم به صورت رابطه ۶ تعریف شده است [۱۱].

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

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

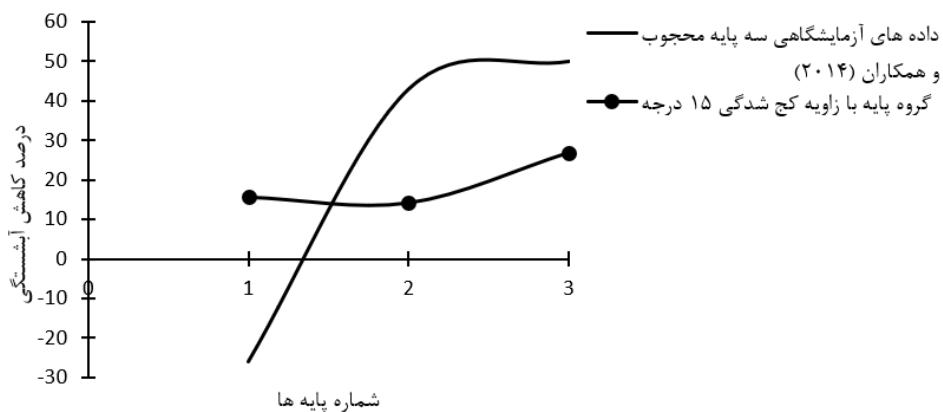
۳-۴- تحلیل ابعادی

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:

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

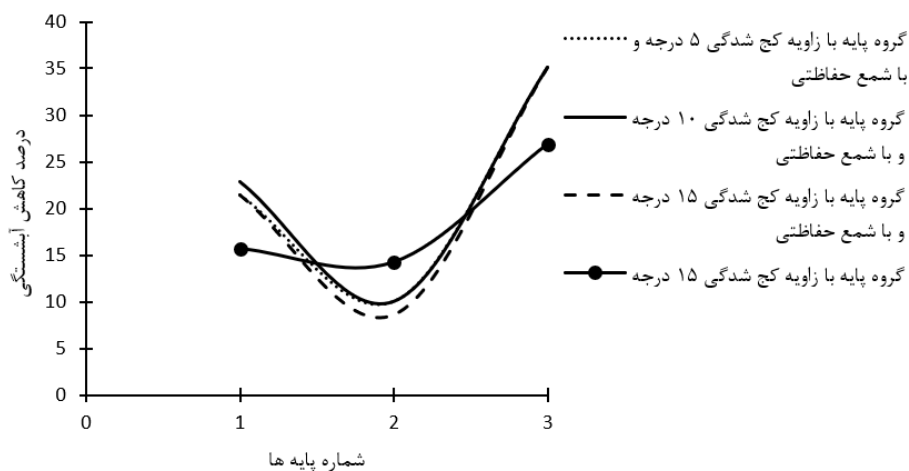
که در آن y عمق جریان، u سرعت جریان، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، v لزوجت سینماتیک، d_{50} اندازه متوسط ذرات رسوبی، ρ_s چگالی رسوب بستر، u_c سرعت آستانه حرکت، σ_g انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی، b قطر پایه پل، d فاصله بین پایه‌ها، B عرض کانال، θ زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان، t زمان از شروع آب‌شستگی، t_e زمان نهایی یا تعادل آب‌شستگی است. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی رابطه ۷ را میتوان به صورت رابطه بی بعد ۸ نوشت:

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



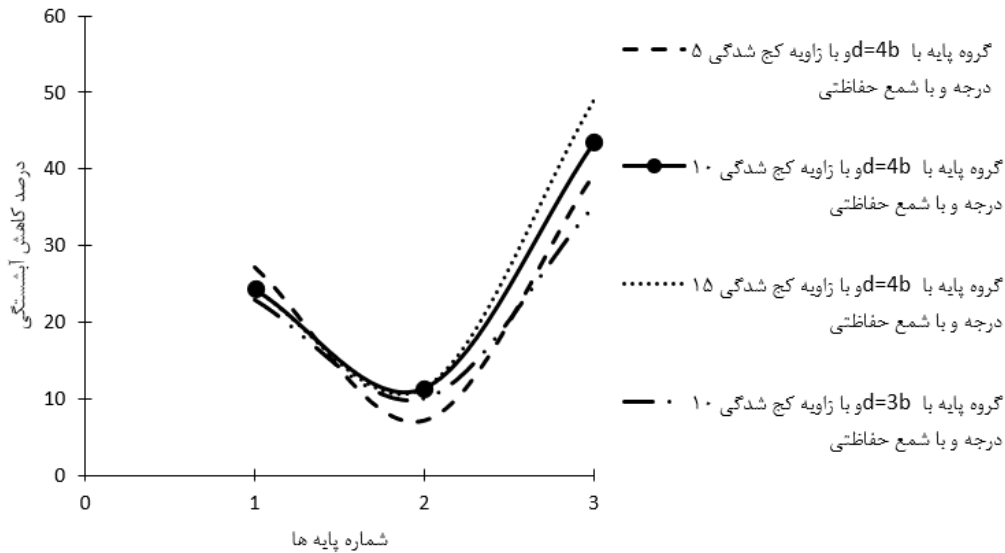
شکل ۳. مقایسه درصد کاهش آبشستگی تحقیق حاضر و محجوب و همکاران (۲۰۱۴)

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



شکل ۴. درصد کاهش آبشستگی برای گروه پایه کج با فاصله بین پایه های $3b$ با زوایای مختلف کج شدگی 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 $2b$



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

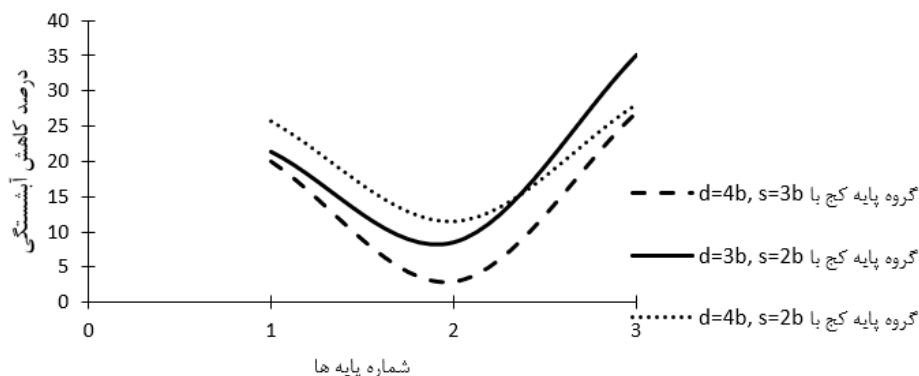
درجه و $d=4b$ در پایه قائم کاهش آبشستگی یکسانی را نشان می دهند. در شرایط $d=4b$, $\theta=10^\circ$ درجه شمع حفاظتی با انتقال رسوب به قسمت جلو و فضای بین پایه ها نسبت به $d=3b$, $\theta=10^\circ$ درجه، تأثیر بیشتری در کاهش آبشستگی در هر سه پایه داشته است. برای گروه پایه با $s=2b$, $\theta=5^\circ$ $d=4b$ کاهش آبشستگی در پایه 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 پایه های کج اول و دوم شده و کاهش آبشستگی ۴/۳ درصدی در پایه قائم شده است.

تأثیر تغییر فاصله بین شمع حفاظتی و گروه پایه کج با زاویه $\theta=15^\circ$ درجه برای فاصله های $d=3b$, $4b$ و $s=2b$, $3b$ در شکل ۶ نشان داده شده است.

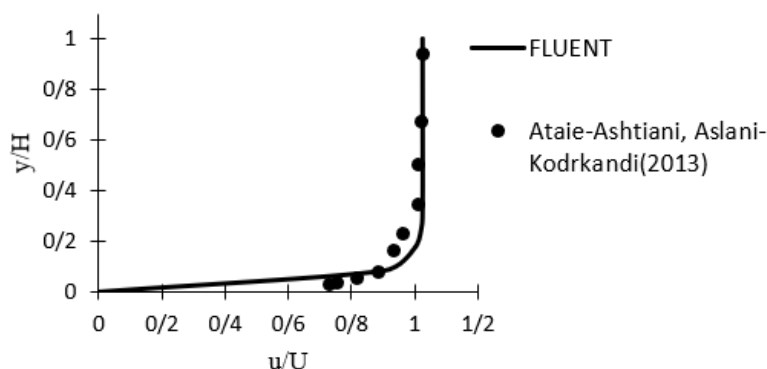
پایه کج اول و کج دوم برای زاویه ۵ تا ۱۵ درجه صفر بوده و در پایه قائم ۱/۴ درصد کاهش آبشستگی داشته است.

در شکل ۵ تأثیر شمع حفاظتی و زوایای کج شدگی 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 ۱۵، ۱۰، ۵، $s=2b$, $d=4b$ نشان داده شده است. درصد کاهش آبشستگی در این تحقیق برای پایه کج سه تایی با زاویه ۵ درجه در جلوی پایه کج اول و پایه قائم و پایه کج 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 می شود گروه پایه با زوایای ۱۵، ۱۰، ۵



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

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

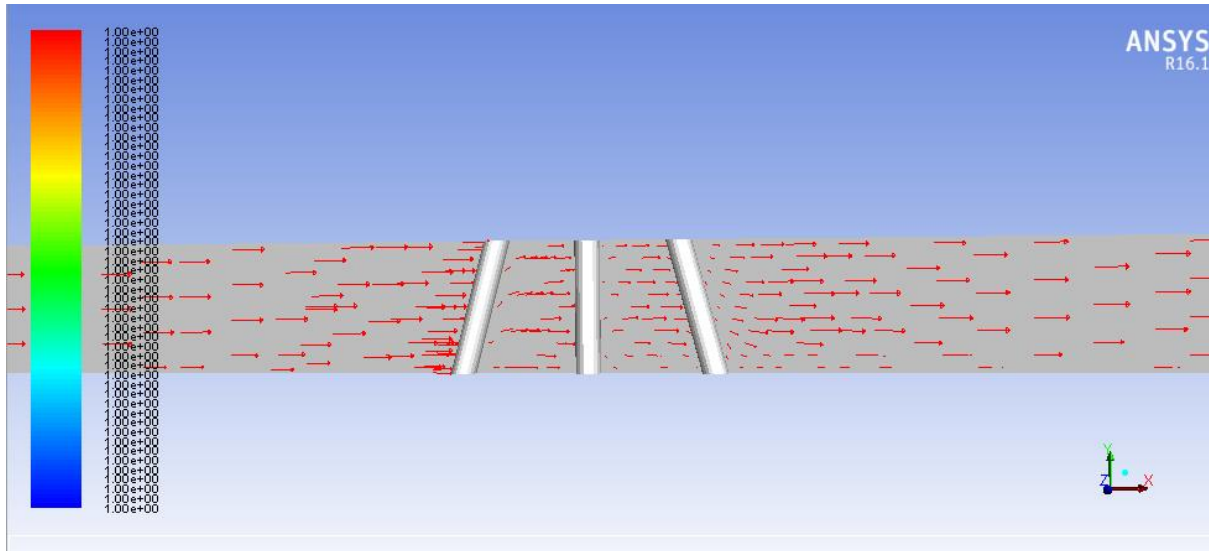


شکل ۷. مقایسه توزیع سرعت مدل عددی و داده های آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۲۰۱۳)

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

کاهش آبرستگی بیشتری در هر سه پایه مشاهده می شود. برای ارزیابی نتایج توزیع سرعت به دست آمده از مدل عددی از داده های 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. همانطور که در این شکل دیده می شود هر دو

نتایج نشان داد که با افزایش فاصله شمع حفاظتی تأثیر پدیده تقویتی کاهش می یابد. اثر پدیده محافظت در صورتی اتفاق می افتد 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 فاصله های $3b$ ، $s=2b$ موجب کاهش آبرستگی موضعی بیشتری می گردد. همچنین با در نظر گرفتن فاصله یکسان شمع حفاظتی ($2b$) و گروه پایه کج با تغییر فاصله بین پایه ها برای فاصله بین پایه ای $4b$ در اثر پدیده محافظت و انتقال رسوب به جلوی پایه ها



شکل ۸. بردارهای توزیع سرعت اطراف سه پایه کج

Fig. 8. Vector of velocity distribution around inclined piers

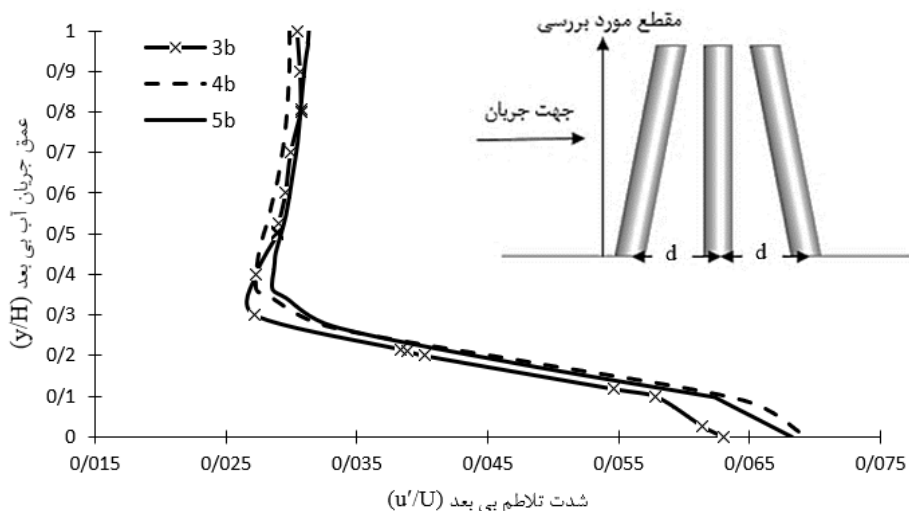
تلاطم در روی بستر کانال بوده و با فاصله گرفتن از بستر مقدار آن کاهش یافته و به کمترین مقدار شدت تلاطم رسیده است سپس به تدریج تا سطح آب افزایش یافته است. برای فواصل مختلف بین پایه ها تفاوت زیادی بین نمودارها مشاهده نمی شود و به دلیل اینکه پایه اول تحت تأثیر پدیده تقویت پایه های دوم و سوم قرار می گیرد در نتیجه منحنی های شدت تلاطم به یکدیگر نزدیک است.

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 پایه ها ثابت ($d=3b$) نظر گرفته شد. نتایج نشان می دهد که شدت تلاطم در عمق جریان 0.44 در حالت حضور شمع حفاظتی با فاصله $2b$ از پایه اول نسبت به فاصله های b و $3b$ از مقدار 0.11 به 0.89 کاهش یافته است.

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 به دست آمد. 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.

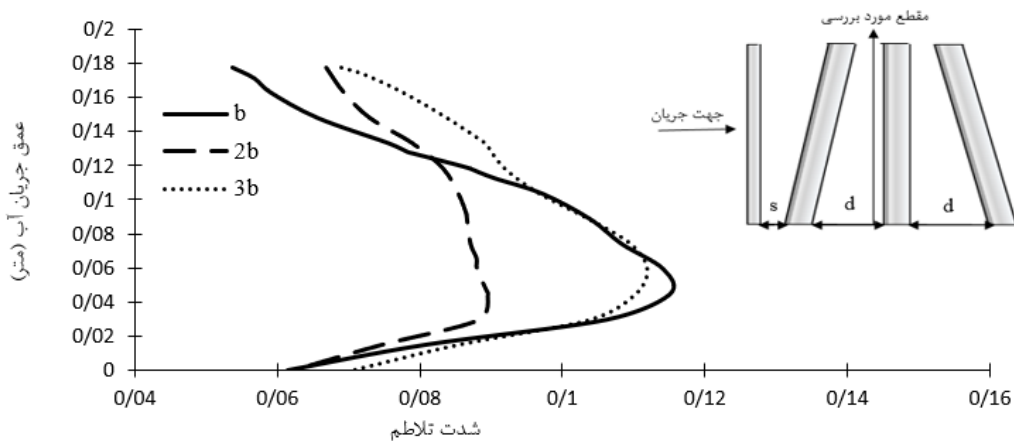
۳-۲- تأثیر استفاده از شمع حفاظتی روی شدت تلاطم در مدل عددی

در شکل ۹ منحنی های شدت تلاطم برای گروه پایه با فواصل $d=3b$, $4b$, $5b$ بررسی 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 می دهند بیشترین شدت



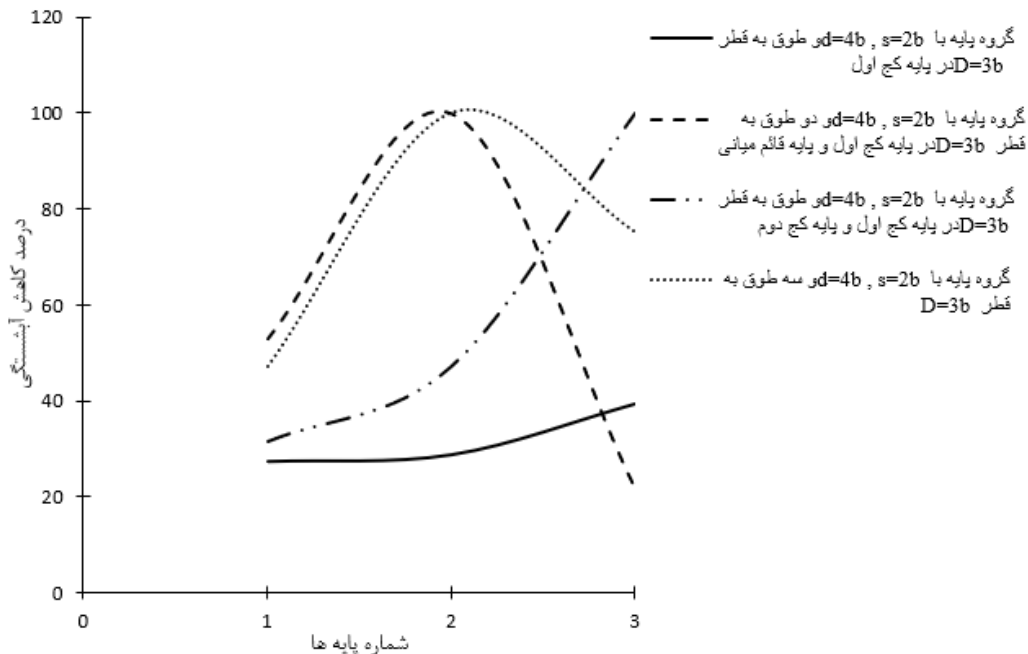
شکل ۹. مقایسه منحنی های توزیع شدت تلاطم در بالادست پایه کج اول برای فواصل مختلف بین پایه ها در گروه پایه سه تایی کج

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



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



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

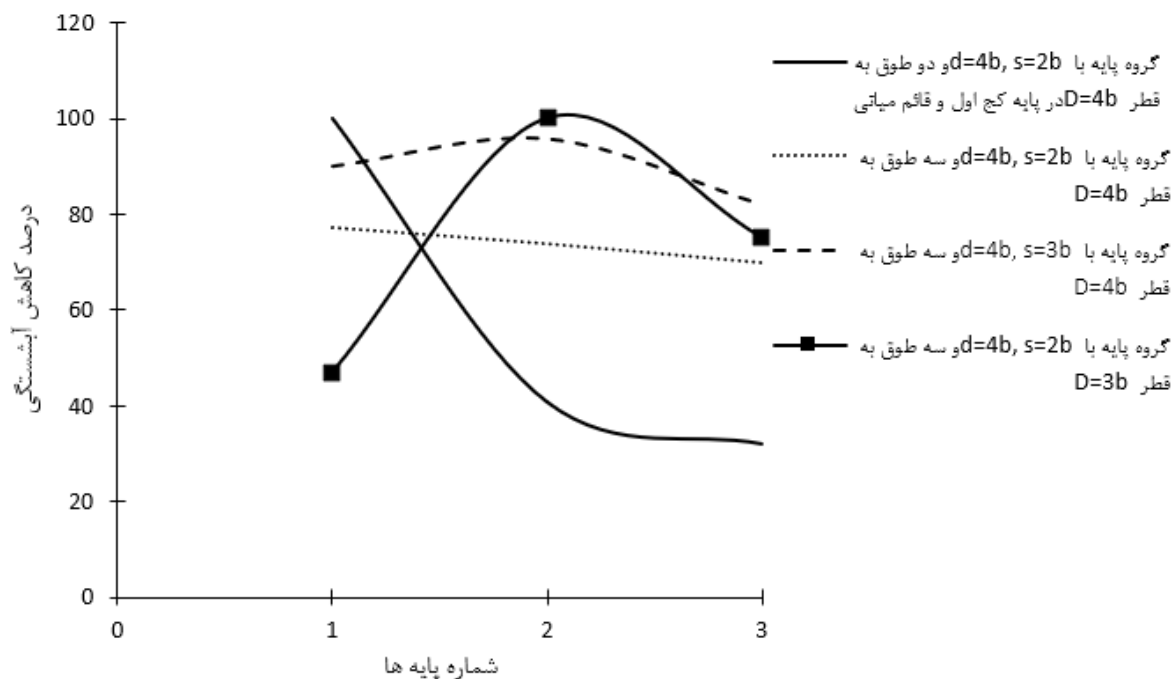
نشان داده شده است. بررسی نمودارها نشان می دهد که در حالت پایه قائم با طوق، بیشترین کاهش آبشستگی دیده می شود. در گروه پایه کج طوق دار در پایه های کج اول و دوم کاهش ۱۰۰ درصدی آبشستگی در اطراف پایه کج دوم مشاهده می گردد. برای گروه پایه کج طوق دار در هر سه پایه نسبت به بقیه حالت ها کاهش آبشستگی بیشتری وجود 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 پایه ها نیز در کاهش قدرت جریان های رو به پایین مؤثر بوده است.

زرانی و همکاران (۲۰۰۶) کاهش آبشستگی را برای دو پایه هم امتداد 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.

۳-۳- استفاده از شمع حفاظتی و طوق در کاهش آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه کج

بررسی های 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 پایه ها را تغییر داده و در حالت قرارگیری طوق در روی یکی از پایه ها مشاهده می شود که ابتدا آبشستگی از جلوی شمع حفاظتی شروع شده و سپس به ترتیب در جلوی پایه های بعدی بدون طوق آبشستگی ایجاد می شود. سپس به ترتیب گرداب برخاستگی پشت طوق پایه انتهایی تا پایه ابتدایی فعال شده و ماسه های اطراف را پراکنده می کند. بعد با گسترش حفره آبشستگی در پشت شمع، جلوی طوق پایه کج اول عمق آبشستگی مشاهده می شود.

در شکل ۱۱ درصد کاهش آبشستگی موضعی در گروه پایه کج با $\theta=15^\circ$, $s=2b$, $d=4b$ استفاده از طوق به قطر $3b$ در تک تک پایه ها



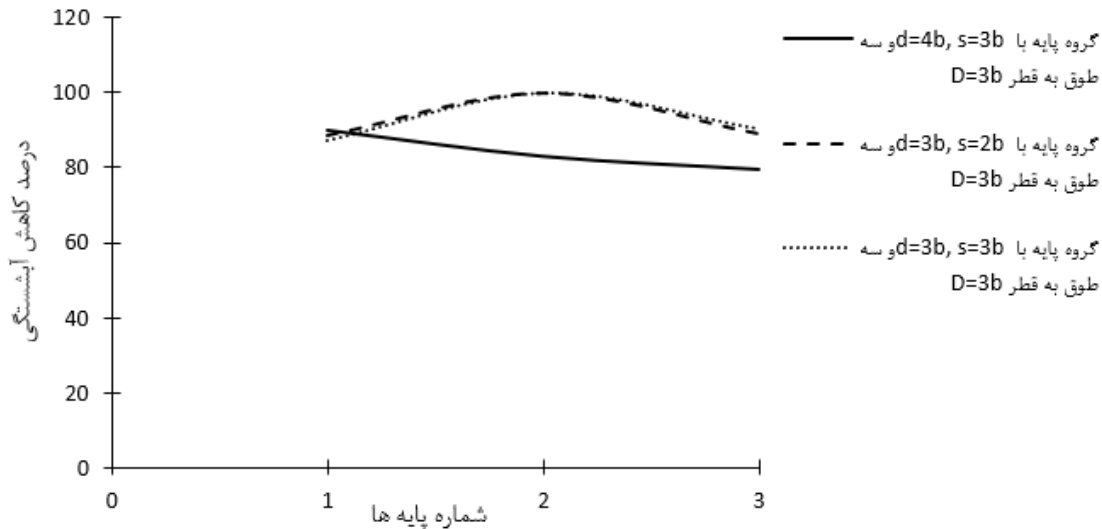
شکل ۱۲. تاثیر کاربرد توأم طوق و شمع حفاظتی با فواصل مختلف در کاهش آبشستگی موضعی گروه پایه کج

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

آبشستگی در پایه ها به ترتیب ۹۰، ۹۵ و ۸۲ درصد می باشد. با مقایسه نمودار کاهش آبشستگی می توان 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 پایه های دوم و سوم) آبشستگی کاهش بیشتری را نشان می دهد. استفاده از طوق ها موجب می شود خطوط جریان اطراف پایه انحراف بیشتری یافته و قدرت گردابه های نعل اسبی و برخاستگی کاهش یافته و از برخورد جریان های رو به پایین با بستر جلوگیری می شود. بنابراین در کاهش آبشستگی موضعی عملکرد بهتری داشته است.

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 می توان 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 می دهد که وجود شمع حفاظتی در جلوی پایه کج اول با فواصل $2b$ و $3b$ تاثیر متفاوتی دارد به طوریکه در شرایط شمع حفاظتی با فاصله $3b$ نسبت به فاصله $2b$ عمق آبشستگی در جلوی پایه ها کاهش بیشتری را نشان می دهد. کاهش



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

۱- 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 ۱۵، $\theta = 5^\circ$ درجه مشاهده میگردد. در صورتیکه 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 کج 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.

۲- 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 فرسایندهی 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 شکل ۱۳ درصد کاهش آبشستگی برای هر گروه پایه کج با فواصل مختلف پایه ها با وجود طوق ($D=3b$) و شمع با فاصله های مختلف $s=2b$ از پایه کج اول نشان داده شده است. بررسی ها نشان میدهد که برای گروه پایه کج با زاویه کج شدگی ۱۵ درجه و فاصله پایه های $d=3b$ و سه طوق به قطر b ۳ 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 b ۲ و b ۳ یکسان به دست آمده است. همچنین با مقایسه نمودارهای کاهش آبشستگی برای شرایط آزمایش هایی که فاصله پایه های 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 پایه ها ($d=4b$) تأثیر متقابل پایه ها 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.

- ter 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)
- ۳-در شرایط گروه پایه کج با فاصله $d=4b$, $\theta=15^\circ$ ، 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 به دست آمد.
- ۴-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.
- ۵-نتایج استفاده از سه طوق به قطر b 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.
- ۶-نتایج مدل عددی نشان داد برای فواصل مختلف بین پایه ها تفاوت زیادی بین نمودارهای شدت تلاطم نسبت به عمق جریان (در فاصله ۶ سانتیمتر از مرکز پایه کج اول) مشاهده نمی شود. استفاده از گروه پایه کج با فواصل بین پایه های $d=3b$ و شمع حفاظتی قرار گرفته در فاصله $s=2b$ از پایه نسبت به فاصله های $s=b$, $3b$ شدت تلاطم کمتری را نشان می دهد.

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 wa-

- ards, 85(3) (2017) 1417-1435.
- [23] W. Xiong, C.S. Cai, B. Kong, X. Kong, Cfd simulations and analyses for bridga-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://1/2/3/wisconsindot.gov/Pages/doing-bus/eng-consultants/cnslt-rsrcs/strct/bridge-manual-standards.aspx>
- 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 Haz-*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Abbaspour, F. Jafari, H. Arvanaghi, A. Hosseinzade-Dalir, *Experimental and numerical investigation of scour around inclined pier group with sacrificial pile and collar*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 3607-3622.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17515.6587

