مقاله پژوهشی

مطالعهٔ آزمایشگاهی تأثیر آستانهٔ بالادست بر کاهش ابعاد چالهٔ آبشستگی در اطراف گروهپایه مرکب

نگار تواضع'، مهدی اسمعیلی ور کی** و امیر ملک پور*

۱ و ۳- بهترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازههای آبی، و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، وابسته پژوهشی، گروه مهندسی آب و محیط زیست، پژوهشکده حوضـه آبـی دریـای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۳۱

چکیدہ

یکی از روش های کاهش آبشستگی اطراف پایه های پل، استفاده از آستانه در مجاورت پایه و پی سازه است. در تحقیق حاضر تأثیر کارگذاری آستانهٔ بالادست بر تغییرات توسعهٔ زمانی و عمق حداکثر آبشستگی در اطراف گروه پایه کے، برای ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع، ضخامتهای سرشمع، آرایش شمع ها و قطر آنها بررسی شد. پایهٔ پل مورد بررسی از دو پایهٔ مستطیلی شکل با ابعاد ۲/۵ در ۳/۵ سانتی متر تشکیل شد که با زاویهٔ ۲۸ درجه روی سرشمعی با ضخامتهای ۳ و ۵ سانتی متر و ابعاد ۱۰ در ۱۶ سانتی متر نصب گردید. سرشمع مذکور روی شمع هایی با آرایش ۲×۲ و ۳×۲ و قطر شمع ۲ و ۳ سانتی متر و ابعاد ۱۰ در ۱۶ سانتی متر نصب گردید. سرشمع مذکور روی شمع هایی با آرایش ۲×۲ و ۳×۲ و قطر شمع ۲ و ۳ سانتی متر و ابعاد ۱۰ در ۱۶ سانتی متر نصب گردید. سرشمع مذکور روی شمع هایی با آرایش ۲×۲ و ۳×۲ و قطر شمع ۲ و ۳ سانتی متر قرار داده شد. آزمایش ها در عمق نسبی جریان(*y/D*) برابر ۲/۶، رقوم نسبی کارگذاری سرشمع (*D*/D) برابر صفر، ۴، ۲، ۳، ۵ و ۴، قطرهای نسبی شمع (*D*/*D*) برابر ۲۵/۲ و ۲۰/۹ ، و در حالت بدون آستانه و در حضور آستانهٔ بالادست در شرایط آب زالل اجراشد. مقایسهٔ نتایج حاکی از آن است که استقرار آستانهٔ بالادست در تراز کارگذاری سرشمع براب و صفر، ۴، ۲، ۳، ۵ و ۴، عمق حداکثر آبشستگی را به طور میانگین به ترتیب ۲۰/۲ ، ۲۰ م ۲۲ ، ۲۵ م ۳ ، ۵ و ۲ هر می می می هم در م مرایط آب زالل اجراشد. مقایسهٔ نتایج حاکی از آن است که استقرار آستانهٔ بالادست در تراز کارگذاری سرشمع براب و صفر، ۴، ۲، ۳، و ۴، معق حداکثر آبشستگی را به طور میانگین به ترتیب ۲۰/۲ ، ۲۹ ، ۲۵/۳ ، ۳۵ ، و ۲/۶ درصد کاهش می دهد.

كليدواژه

کاهش آبشستگی، آرایش شمع، رقوم کارگذاری سرشمع، گروهپایه کج

مقدمه

* نگارنده مسئول:

در چرخهٔ حمل و نقـل زمینی، پـل از اجـزای اصـلی (2001. محسوب می شود. یکی از علل اصلی تخریب پل ها بـهویـژه به طـور کلی، آ هنگام جاری شدن سـیلاب، توسـعهٔ عمـق آب شسـتگی در می توان به سـه بخـه مجـاورت و زیـر پایـه و فونداسـیون آن اسـت. از ایـنرو ناشـی از انقبـاض ما محافظت از پایه ها در مقابل آب شسـتگی کـه می توانـد بـا (اطراف پل ها و تکیه روش های پیش بینی عمق حداکثر آب شسـتگی محتمـل و (1001. Davis, 2001) و نمو از آن عمق یا کاهش الگوی جریـان د عمق آب شستگی صورت گیرد، از مسـائل مهـم در ایمنـی جریان رو به پایین، ^ع

Email: esmaeili @guilan.ac.ir esmaeili.varaki@yahoo.com

پلها در مرحلهٔ طراحی است , Richardson & Davis, 2001) (2001. به طور کلی، آبشستگی را از نظر علل ایجاد آن میتوان به سه بخش آبشستگی عمومی، آبشستگی ناشی از انقباض مسیر آبراهه و آبشستگی موضعی (اطراف پلها و تکیه گاهها) تقسیم کرد & Richardson (اطراف پلها و تکیه گاهها) تقسیم کرد & Davis, 2001) الگوی جریان در مجاورت پایههای پل متشکل از جریان رو به پایین، گردابههای نعل اسبی و گردابههای

http://doi. 10.22092/idser.2020.341368.1419

برخاستگی است. این گردابهها با افزایش تنش برشی موضعی در مجاورت پایههای پل موجب فرسایش در جلو پایه میشوند و این فرسایش بهتدریج به طرفین پایه گسترش مییابد. جدایی جریان در طرفین پایه گردابههای برخاستگی ایجاد میکند که ناپایدارند و مانند گردبادهایی کوچک ذرات رسوب را از بستر بلند و به پاییندست منتقل میکنند. در نتیجهٔ این فرآیندها، یک حفرهٔ آبشستگی اطراف پایه شکل میگیرد و بهتدریج توسعه می بابد (2004 and 2006).

نظر به اهمیت مسئلهٔ آبشستگی اطراف پایههای پل، تاکنون در زمینهٔ پارامترهای اثرگذار بر تغییرات زمانی و عمق حداکثر آبشستگی تحقیقات زیادی شده است. نتایج تحقیقات برای پایه با سطح مقطع یکنواخت نشان میدهد که بیشینهٔ عمق آبشستگی تا ۲/۴ برابر قطر پایه خواهد رسید. در شرایطی که سطح مقطع متفاوت باشد، مانند شرایطی که پایه روی فونداسیون قرار گرفته است، بسته به تراز کارگذاری فونداسیون مقدار آبشستگی

متفاوت خواهدبود (Melville & Sutherland, 1988). به دلایل اقتصادی و سازهای نیاز است تا پایههای پل روی کلاهکی احداث شوند که توسط سر شمع یا بهصورت یکپارچه در بستر ساخته میشود. تحقیقات در زمینهٔ آبشستگی گروه شمعها نشان میدهد که چهار عامل اصلی تقویت کننده، حفاظتی، گردابهٔ نعل اسبی بههم فشردهشده و گردابههای جاری بر آبشستگی اطراف گروه شمعها مؤثرند (Breusers & Raudkivi, 1991).

سلیم و جونز (Salim & Jones, 1996) عمق سلیم و جونز (Salim & Jones, 1996) عمق آبشستگی اطراف گروه پایهٔ مستغرق و غیر مستغرق را مطالعه کردند و معادلاتی برای اثر فاصلهٔ شمع و زاویهٔ حملهٔ جریان بر مقدار آبشستگی اطراف گروه شمعها ارائه دادند. ژائو و شپارد (Zhao & Sheppard, 1998) اثر فاصله بین شمعها و زاویهٔ برخورد آب با گروه شمعها را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش زاویهٔ

برخورد، مقدار عمق حداکثر آبشستگی بیشتر می شود. سومر و همکاران (Sumer *et al.*, 2005) هندسهٔ آبشستگی اطراف گروه شمع را با تغییر فاصلهٔ شمعها بررسی و نتیجه گیری کردند که با افزایش فاصلهٔ بین شمعها، مقدار عمق آبشستگی به مقدار عمق آبشستگی معادل با تک شمع نزدیک می شود.

عطائی آشتیانی و همکاران & Ataie-Ashtiani (Ataie-Ashtiani) (Ataie-Ashtiani گروه شمع را Beheshti, 2006) تبرسی و نشان دادند که آبشستگی اطراف گروه شمع نسبت به آبشستگی اطراف شمع منفرد متفاوت است. برای فواصل بسیار کوچک بین شمعها، گروه شمع مانند پایهای منفرد عمل می کند و برای فواصل بزرگتر شمعها، پایهای منفرد عمل می کند و برای فواصل بزرگتر شمعها، اثر تداخلی آنها با توجه به آرایش گروه شمع کاهش می یابد. این محققان یک ضریب تصحیح را برای بر آورد عمق حداکثر آبشستگی موضعی برای گروه شمعها معرفی کردند.

عطائی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani et al., مرکب را برای (2010 آبشستگی موضعی اطراف پایههای مرکب را برای ترازهای مختلف سرشمع، اندازههای شمع و شکلهای پایههای مرکب بررسی و اعلام کردند تراز قرارگیری پایههای می کد منجر به عمق حداقل آبشستگی می گردد بر اساس طول بیرونزدگی سرشمع و مشخصههای هندسی پایه متفاوت است.

امینی و همکاران (Amini et al., 2012) آبشستگی موضعی اطراف گروه شمعها را در جریان کمعمق بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که عمق آبشستگی به قطر شمع، فاصلهٔ شمع و نسبت استغراق بستگی دارد.

فرارو و همکاران (Ferraro et al., 2013) اثر ضخامت سرشمع بر عمق حداکثر آبشستگی را در پایههای مرکب بررسی کردند و نشان دادند که بهطور کلی هر چه سرشمع ضخیمتر باشد، آبشستگی عمیقتر خواهد بود.

مقایسهٔ نتایج بهدست آمده همچنین نشان داد وقتی سرشمع در بالای بستر قرار دارد، تأثیر ضخامت آن بر عمق آبشستگی با افزایش فاصله بین بالای سرشمع و سطح بستر کاهش مییابد. آنها همچنین نشان دادند برای سرشمع مدفون، تأثیر ضخامت آن بر عمق حداکثر آبشستگی به عمق قرارگیری آن در زیر بستر بستگی دارد.

مورنو و همکاران (Moreno et al., 2015) تأثیر عرض نسبی پایه و ارتفاع سرشمع را بر عمق آبشستگی موضعی اطراف پایههای مرکب بررسی و گزارش کردند که توسعهٔ زمانی عمق آبشستگی و عمق تعادل آبشستگی مربوط در پایههای مرکب به طور کلی تحت تأثیر موقعیت نسبی سرشمع، عرض نسبی پایه، ضخامت نسبی سرشمع و شکل اجزای پایه مرکب قراردارد. این محققان با بررسی معیار متداول برای زمان تعادل آبشستگی در پایههای مرکب، معیاری جدید معرفی کردند.

مورنو و همکاران (Moreno et al., 2016) با ارائهٔ پیشنهاد روشی جدید برای ارزیابی سهم هر جزء پایهٔ مرکب (پایه، سرشمع، گروه شمع) در مقابل عمق تعادل آبشستگی کل نشان دادند که سهم هر جزء به شکلی چشمگیر به موقعیت آن نسبت به سطح بستر و هندسهٔ پایه بستگی دارد.

وانگ و همکاران (Wang et al., 2016) آبشستگی موضعی اطراف پایههای استوانهای دوقلو را در آزمایشگاه بررسی کردند و نشان دادند در شرایط جریان یکسان، عمق آبشستگی اطراف پایهٔ بالادست در فواصل مختلف پایهها تقریباً مشابه عمق آبشستگی اطراف پایهٔ منفرد است.

اسمعیلی ورکی و همکاران Esmaeili Varaki *et al.*, اسمعیلی ورکی و همکاران (2014 با بررسی تأثیر کجشدگی پایه بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه پایه کج نشان دادند مقدار آبشستگی در گروه پایه کج از حالت تکپایه، بهدلیل

تأثیر توام دو پایه و نیز کجشدگی آن بهسمت بالادست، بیشتر است.

اسمعیلی ورکی و همکاران ...(2019 اسمعیلی ورکی و همکاران ... (2019، با مقایسهٔ نتایج بهدستآمده از بررسی آزمایشگاهی آبشستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر گروه شمع نشان دادند که تغییر آرایش شمعها از ۲×۲ به تح۲ بهطور متوسط عمق حداکثر آبشستگی را در قطرهای نسبی (نسبت قطر شمع به عرض پایه) شمع ۶/۰ و ۹/۰ بهترتیب ۵۰ و ۶۰ درصد افزایش میدهد. این محققان همچنین نشان دادند با افزایش ضخامت نسبی سرشمع (نسبت ضخامت سرشمع به عرض پایه) از ۹/۰ به مختلف شمع بهطور متوسط ۲۰ درصد و با تغییر قطر شمعها از ۶/۰ به ۹/۰ در ترازهای نسبی کار گذاری سرشمع بالای بستر، عمق حداکثر آبشستگی بهطور متوسط به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد افزایش می یابد.

به دلیل اهمیت موضوع کاهش آبشستگی در اطراف پایههای پل، تحقیقات فراوان است. گامهای درنظر گرفته-شده برای کاهش آبشستگی به دو دسته طبقهبندی میشوند: ۱) گامهای اصلاح کنندهٔ الگوی جریان که اساس کار آنها کاهش قدرت جریان رو به پایین و گردابهٔ نعل اسبی اطراف پایههاست، ۲) مسلح کردن سطح بستر در اطراف پایههای پل با استفاده از مصالحی مانند پوشش سنگچین یا گابیون (Tafarojnoruz *et al.*, 2012).

زراتی و همکاران (Zarrati *et al.*, 2006) با بررسی کاهش آبشستگی موضعی در مجاورت گروه پایههای پل با استفاده از طوقه و سنگچین نشان دادند طوقهها روی دو پایه در جهت جریان مؤثرند و طوقههای مستقل، در مقایسه با طوقههای یکپارچه، عملکرد بهتری دارند با این حال، طوقهها در کاهش آبشستگی اطراف دو پایه عرضی چندان مؤثر نیستند. برای حالت دو پایه در راستای جریان، ترکیبی از طوقههای یکپارچه و سنگچین موجب

می شوند تا آب شستگی به ترتیب حدود ۵۰ و ۶۰ در صد برای پایه های بالادست و عقبی کاهش یابد.

گریمالدی و همکاران (Grimaldi et al., 2009) با بررسی کارایی آستانه ها در کاهش آب شستگی موضعی اطراف پایهٔ پل استوانه ای نشان دادند یک آستانهٔ بستر واقع در فاصلهٔ کوتاه پایین دست پایه منجر به کاهش عمق، مساحت و حجم آب شستگی می شود.

ياليارا و همكاران (Pagliara et al., 2010) كارايي آستانه و گابیون در مقابل آبشستگی پایهٔ پل را در حضور جسم شناور بررسی کردند و نشان دادند جسم شناور ممکن است راندمان آستانه و گابیون را برای محافظت در مقابل آبشستگی پایهها کاهش دهد. بررسی نتایج بهدستآمده حاکی از آن است که حضور جسم شناور، شروع آبشستگی را به تأخیر میاندازد اما وقتی عمق آبشستگی آستانه را از حالت مدفون خارج کند، آبشستگی به سرعت توسعه میابد و به عمق مشابه بدون حضور آستانه یا گابیون (به خصوص در حضور جسم شناور) میرسد. نتایج اندازه گیریها نشان میدهد زبری سطح گابیون قادر خواهد بود تاخیر بیشتری در روند آبشستگی در حضور جسم شناور در پایه پل به وجود آورد. این محققان دریافتند که برای جسم شناور با شکل پلان مستطیلی، شکل جلو جسم شناور و عرض نسبی آن تأثیر کمی بر عمق حداکثر آبشستگی دارد در حالی که لاگاس و همکاران (Lagasse et al., 2009) مشاهده کردند که عرض نسبی جسم شناور تأثیر زیادی بر شدت جریان رو به پایین و درنتیجه بر عمق حداکثر آبشستگی دارد.

تفرج نوروز و همکاران (Tafarojnoruz et al., 2012) شش نوع اقدام متقابل اصلاح کنندهٔ الگوی جریان در مقابل آبشستگی در پایههای پل را در بهترین حالت توصیه شده در تحقیقات گذشته بررسی کردند؛ این شش اقدام عبارتاند از: پرههای مستغرق، شمعهای قربانی شوندهٔ عرضی، آستانه، شکاف پایه، طوقه و استفاده از

کابل. کلیهٔ گزینههای مورد بررسی عملکرد شان از نظر کاهش عمق آبشستگی پایین بود و یا مشکلات جدی عملی نشان دادند. این محققان می گویند عملکرد بالای گزارش شدهٔ برخی از این اقدامات در مقالهها به طور قابل توجهی به شرایط آزمایشگاهی مرتبط است. عملکرد بالا اما نیرقابل اعتماد می تواند به دلیل سرعت کم جریان، عمق کم جریان، مدت زمان کوتاه آزمایش و استفاده از ماسهٔ ریز باشد. در انتها، طراحی یک شکاف پایه مورد بحث قرار گرفت و حالت بهینه برای آن پیشنهاد شد.

سعادتی پاچه کناری و همکاران (Saadati Pacheh) (Saadati Pacheh، تأثیر موقعیت کارگذاری آستانه بر مقدار آبشستگی اطراف گروه پایه کج با فونداسیون را بررسی کردند و نشان دادند که استقرار آستانه در مقابل فونداسیون بیشترین تأثیر را در کاهش عمق حداکثر آبشستگی دارد و مقدار کاهش آبشستگی در شرایطی چشمگیرتر است که رقوم کارگذاری فونداسیون همتراز بستر باشد.

اسمعیلی ورکی و همکاران ,.(Esmaeili Varaki et al.) (2016 با بررسی آزمایشگاهی تأثیر موقعیت آستانه بر توسعهٔ زمانی عمق چالهٔ آبشستگی اطراف گروهپایه کچ مستقر روی فونداسیون نشان دادند که برای کلیه ترازهای کارگذاری فونداسیون، مقدار عمق لحظهای آبشستگی با استقرار آستانهٔ بالادست بهطور متوسط ۲۲ درصد، آستانهٔ میانی ۱۸ درصد و آستانهٔ انتهایی ۱۵ درصد کاهش می اید.

با توجه به اهمیت نقش آبشستگی در ناایمنی پلها، تاکنون از جنبههای گوناگون به موضوع آبشستگی اطراف پایهها با هندسههای مختلف پرداخته و روشهای کاهش آن بررسی شده است. پارامترهای مختلف هیدرولیکی، هندسی و رسوبی میتواند بر مقدار عمق حداکثر آبشستگی اثرگذار باشد. از میان هندسههای مختلف پلها از ساده تا مرکب، میتوان به گروه پایههای کچ **مواد و روشها** الف) تحلیل ابعادی

عوامل تأثیر گذار بر آبشستگی موضعی اطراف گروه پایهٔ مورد بررسی در حضور آستانه مجموعهای هستند از پارامترهای توصیف کننده که اندر کنش آنها در مسیر جریان موجب افزایش یا کاهش آبشستگی می گردد. این پارامترها مشخصات نوع سیال و رسوب بستر، هندسهٔ پایهٔ پل، شمعها و موقعیت آستانه، شرایط هیدرولیکی جریان و زمان هستند که آنها را می توان بهصورت رابطهٔ ۱ نوشت. مستقر روی سرشمع یا فونداسیون اشاره کرد. بهدلیل اثرهمزمان کجشدگی و نیز ترازکارگذاری سرشمع و هندسه آن، مقدار آبشستگی با شرایط گروه پایه ساده متفاوت است که در مطالعات گذشته به آن پرداخته شده-است. اما تاکنون در خصوص کارایی آستانه در کاهش آبشستگی اطراف گروهپایه کج مستقر روی سرشمع تحقیق نشده است، از این رو در تحقیق حاضر تأثیر استقرار آستانه در بالادست سرشمع، تراز کارگذاری سرشمع و ضخامت آن، قطر و آرایش شمعها بر تغییرات عمق آبشستگی بررسی شده است.

$$f_{I}=(y, d_{s}, D, D_{pc}, L_{pc}, T_{pc}, d_{p}, l_{m}, l_{n}, m, n, L, D_{50}, Z, U, U_{c}, \rho, \rho_{s}, \mu, g, \sigma_{g}, \alpha, \beta, t, t_{e})=0$$
(1)

جریان؛ U_c سرعت جریان برای شرایط آستانهٔ حرکت؛ $\rho = \varphi$ چگالی آب؛ $D_c = \varphi$ گیالی رسوبات بستر؛ $\mu = 4$ ورجت دینامیک؛ $g = c_s$ شتاب ثقل؛ $\sigma_g = 1$ انحراف معیار مصالح رسوبی $=\beta$ بستر؛ $\alpha = 2$ (اویهٔ انحراف پایهها در صفحهٔ موازی جریان؛ $\beta = 2$ زمان از زاویهٔ انحراف پایهها در صفحهٔ عمود بر جریان؛ t = 2 زمان از شروع آبشستگی؛ و t = 2 زمان تعادل آبشستگی است (شکل ۱).

با بهکارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطهٔ ۱را میتوان به صورت رابطهٔ بیبعد ۲ نوشت. که در آن،

=D عمق جريان؛ $=d_s$ عمق لحظ ای آبشستگی؛ $D = a_{pc}$ عرض سرشمع؛ $=L_{pc} = d_{e}$ سرش مع؛ عرض پايۀ پل؛ $=D_{pc} = a_{d}$ سرشمع؛ $=L_{pc} = d_{e}$ سرش مع؛ $=T_{pc} = d_{pc}$ ضخامت سرشمع؛ $=d_{p} = a_{d}$ فاص لۀ طولی شمعها؛ $n = a_{d}$ فاص لۀ عرضی شمعها؛ m = r تعداد شمع همراستا با جريان؛ n = r تعداد شمع در عرض جريان؛ $L = a_{d}$ فاص لۀ قرارگيری آستانه نسبت به دماغۀ پايه يا سرشمع؛ $=D_{50}$ فاص لۀ قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک تر است؛ $Z = a_{d}$

 $f_{2}\left(\frac{y}{D},\frac{d_{s}}{D},\frac{D_{50}}{D},\frac{D}{D_{pc}},\frac{T_{pc}}{D},\frac{d_{p}}{D},\frac{Z}{D},\frac{L}{d_{p}},\frac{U}{L_{pc}},\frac{Ut}{D},\frac{Ut_{e}}{D},\frac{U}{D},\frac{Q}{D},\frac{\rho_{s}}{\rho},Re,Fr,m,n,\sigma_{g},\alpha,\beta\right)=0$ (Υ)

جریان، عدد رینولدز در تمام آزمایش ها از ۹۱۰۰ بیشتر بود و از این رو از تأثیر این پارامتر صرف نظر شد و رابطهٔ ۲ به صورت رابطهٔ ۳ اصلاح شد.

$$\frac{d_s}{D} = f_3\left(\frac{y}{D}, \frac{T_{pc}}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{z}{D}, \frac{u}{d_p}, \frac{u}{D}, \frac{ut_s}{D}, Fr, m, n\right) \quad (\Upsilon)$$

با توجه به شرایط آزمایشگاهی در تحقیق حاضر، از میان پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایهٔ پل، زاویههای پایههای پل در صفحه جریان و قائم ثابت در نظر گرفته شد. پارامتر انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی به جهت یکنواختی رسوبات مورد استفاده بر تغییرات عمق آبشستگی بی تأثیر است. همچنین، به دلیل آشفته بودن



شکل ۱ – معرفی پارامترهای هندسی گروه پایه کج و سرشمع در حضور اُستانهٔ بالادست Fig. 1- Defination of geometic parameters ofinclined piers and pilecape in presence of upstream sill

 ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایشها آزمایشهای مورد نظر در آزمایشگاه هیدرولیک و مدلهای فیزیکی-هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی مستطیلی شکل با سیستم بازچرخانی به طول ۸/۶ متر، عرض ۸/۹ متر و عمق ۱ متر اجرا شد. دیوارههای فلوم از جنس شیشه و کف آن آهنی است (شکل ۲-الف).

به منظ ور تأمین دبی جریان، از پمپ سانتریفیوژ استفاده شد که میتواند دبی جریان را تا ۰/۰۷ متر مکعب بر ثانیه تأمین کند. با توجه به اهمیت تنظیم دقیق دبی در آزمایشها ، از یک دستگاه کنترل کنندهٔ سرعت دورانی الکتروموتور پمپ استفاده شد که با حداقل اتلاف وقت این کار میسر می گردد. برای اندازه گیری دبی جریان از دبی سنج التراسونیک آداکفلو ساخت شرکت آداک تجهیز ایرانیان با دقت ۰۱/±۰ لیتر بر ثانیه استفاده شد که روی لولهٔ مکش پمپ نصب شده بود. جریان خروجی از پمپ آبتدا وارد مخزن اولیه و پس از عبور از آن وارد مخزن آرام کننده پاییندست میشود و سرانجام با عبور از می گردد. محل نصب پایه پل ۵ متر بعد از ورودی انتخاب شد تا از توسعه یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایهٔ پل اطمینان حاصل شود.

گروه پایهٔ مورد بررسی در این تحقیق از دو پایهٔ مستطیلی از جنس آلومینیم به طول و عرض ۲/۵ و ۲/۵ سانتیمتر تشکیل شده که با زاویهٔ ۲۸ درجه روی سرشمع مستطیلی از جنس چوب-پلاستیک به طول و عرض ۱۰ و ۱۶ سانتیمتر نصب شده بود. در انتخاب ابعاد نهایی گروه پایه، ضوابطی که محققان در خصوص تأثیرناپذیری مقدار پایه، ضوابطی که محققان در خصوص تأثیرناپذیری مقدار نظر رادکیوری و اتما (Raudkivi & Ettema, 1983) نظر رادکیوری و اتما (Raudkivi & قداداند رعایت گردید. طبق چنانچه نسبت عرض فلوم به عرض پایه از ۲۵/۶ بیشتر باشد، دیوارههای فلوم به عرض پایه از ۲۵/۶ بیشتر مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۲۵ و مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۲۵ و در قطرهای ۲ و ۳ سانتیمتر تهیه و در قالب آرایشهای در قطرهای ۲ و ۳ سانتیمتر تهیه و در قالب آرایشهای

آستانهٔ مورد بررسی شامل صفحهٔ پلاکسی گلاس است به ضخامت ۶ میلیمتر، هم عرض فلوم و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر (هم تراز با سطح رسوبی بستر)، که عمود بر مسیر جریان در موقعیت بالادست سرشمع نصب گردید (شکل ۲-ج).

انـدازهٔ ذرهٔ رسـوب یکـی از عوامـل مـوَّثر بـر عمـق آبشستگی است. برای حذف اثر اندازهٔ ذرهٔ رسوب بر عمق مطالعة أزمايشگاهي تأثير أستانة بالادست بر كاهش ابعاد چاله ...

آبشستگی پایهٔ پـل بـود. بـرای شـبیهسـازی بهتـر بسـتر رسوبی کانال، بالادست و پایین دست بازه مورد مطالعه برای آبشستگی پایه پل از رسوبات درشتدانه که در مرحله الک کردن باقی مانده بود، پوشانده شد.

قبل از شروع آزمایشها لازم بود تا سرعت آستانه حرکت برای قطر رسوبات مورد استفاده مشخص گردد. بنابراین، وضعیت آستانهٔ حرکت به صورت آزمایشگاهی بررسی و متوسط سرعت جریان برای آستانه حرکت ۲۸/۰ متر بر ثانیه تعیین گردید. مقایسهٔ نتایج بهدست آمده، همخوانی مطلوبی با دیاگرام شیلدز و روابط تجربی نشان داد.

آبشستگی موضعی، نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی باید از ۲۵–۲۰ بیشتر باشد که برای عرض یایه یـل در تحقیق حاضر ۵۰ به دست آمد (& Melville Sutherland, 1988). رادکیوی و اتما (& Raudkivi Ettema, 1983) ملی گویند برای جلوگیری از تشکیل شکنج در سرعتهای نزدیک به آستانهٔ حرکت، قطـر ذرات رسوبی باید از ۲/۷ میلیمتر بیشتر باشد. قطر ذرات رسوبی مورد استفاده در این تحقیق یکنواخت و برابر ۰/۷ میلیمتر بود که از ماسه معدنی تهیه و در بازهای به طول ۱/۵ متر، ضخامت ۳/۳ متـر در فاصـله ۵ متـری از ابتـدای کانال قبرار دادہ شند کیہ محبدودۂ مبورد مطالعتہ بنرای



شکل ۲- الف) طرح کلی فلوم آزمایشگاهی، ب) و ج) نمایی از گروهپایه کج در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع در شرایط بدون آستانه و با أستانهٔ بالادست

Fig. 2- a) Scheme of experimental flume, b and c) View of inclined piers and pile cape for without sill and in presence of upstream sill conditions

در بررسی آبشستگی، تعیین زمان تعادل اهمیت تعادل پیشنهاد کردهاند. ملویل و چیو & Melville) (Chiew, 1999 می گویند زمان تعادل زمانی است که

ویژهای دارد. محققان معیارهای مختلفی برای تعیین زمان

تحقیقات مهندسی سازههای آبیاری و زهکشی/جلد ۲۱/ شماره ۸۰/ پاییز ۱۳۹۹/ ص ۶۰–۳۷

تقریبا ۸۵ درصد آبشستگی در این مدت زمان رخ میدهد، به صورت پیوسته با استفاده از عمق سنج نقطهای با دقت $1/1 \pm$ میلیمتر و عمق حداکثر آبشستگی نیز بعد از قطع آزمایش طی ۲۴ ساعت با استفاده از متر لیزری با دقت $1 \pm$ میلیمتر اندازه گیری شد. در این تحقیق برای بررسی تأثیر توام آستانهٔ بالادست، تراز کارگذاری سر شمع، آرایش شمعها و ضخامتهای مختلف سرشمع بر نمییرات عمق آبشستگی، در مجموع ۷۲ آزمایش برای ضخامتهای نسبی مختلف سرشمع ا X <و تراز نسبی مختلف نسبی شمع (D/p) متفاوت، آرایش شمعها T <و T <، کارگذاری سرشمع(Z/D) مختلف اجرا شد که دامنهٔ آنها در جدول ۱ آورده شده است. میزان آبشستگی در دورهای ۲۴ ساعته کمتر از ۵ درصد قطر پایه باشد. در این پژوهش از این معیار استفاده شد. برای این منظور، ابتدا آزمایشی بهمدت ۷۲ ساعت و با سرعت نسبی(*U/U*) برابر ۹۵/۰ اجرا و تغییرات عمق آبشستگی با استفاده از عمقسنج با دقت ۰/۱ میلیمتر اندازه گیری شد. مقایسهٔ نتایج به دست آمده نشان داد که آبشستگی کمتر از ۵ درصد قطر پایه می شود. بنابراین، بعد از گذشت ۲۴ ساعت از شروع آزمایش، تغییرات عمق زمان تعادل برای کل آزمایشها ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. در هر یک از آزمایشها، آب به تدریج و به آرامی وارد فلوم شده بعد از تنظیم دبی، عمق نسبی جریان (*V/*) در کانال با مانور دریچه انتهایی برابر ۶/۴۲ برقرار گردید. در کلیهٔ آزمایشها تغییرات آب شستگی به مدت ۷ ساعت، که

جدول ۱- دامنهٔ پارامترهای آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر آستانه در کاهش آبشستگی In Range of experimental parameters to study effect of upstream sill on reduction of scour denth ا

Table 1- Kange of experimental parameters to study effect of upstream sin on reduction of scour depth					
تراز نسبی قرارگیری	عمق نسبی		قطر نسبى		ضخامت نسبى
سر شمع(Z/D) Relative installation of top of pile cap	جريان (y/D) Relative depth of flow	آرایش شمعها Pile arrangement	شمع(<i>dp/D</i>) شمع Relative pile diameter	شرایط آستانه Sill condition	سر شمع (<i>T_{pc}/D</i>) Relative pile cap thickness
0, 1, 2, 3 and 4	6.42	2*2 &2*3	0.85 & 0.57	None-sill (NS) and upstream sill (US)	0.85
0, 1, 2, 3 and 4	6.42	2*2 &2*3	0.85 & 0.57		1.42

نتایج و بحث

الـف) بررسـی تـأثیر اسـتقرار آسـتانه بـر الگـوی جریان و توسعهٔ زمانی عمق آبشستگی

ب منظور درک بهت ر از تأثیر آستانه ب ر الگوی جریان نزدیک شونده ب پایههای پل، جریان با استفاده از تزریق مادهٔ رنگی آشکارسازی شدکه نمونهای از تصویرهای تهیه شده در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می دهد با استقرار آستانه بالادست، گردابههای شکل گرفته در مقابل سر شمع در قسمت بالادست پایه در چالهٔ

آبشستگی مقابل آن به تله میافتند و آستانه مانع از توسعهٔ بیشتر عمق آبشستگی به پاییندست پایه میگردد در نتیجه عمق چالهٔ آبشستگی کاهش مییابد. علاوهبراین، با افزایش تراز کارگذاری سرشمع، امکان عبور بیشتر بخشی از جریان از فضای بین سرشمع و شمعها فراهم میگردد. به این فضای بین سرشمع و شمعها فراهم میگردد. به این آستانه در کاهش عمق آبشستگی پیچیدهتر می شود. در ادامه مقایسهٔ مقادیر اندازه گیری شده عمق آبشستگی آورده شده است.

مطالعة أزمايشگاهي تأثير أستانة بالادست بر كاهش ابعاد چالة ...



شکل ۳-نمایی از آشکارسازی جریان نزدیکشونده به گروهپایه کج برای هندسههای مختلف گروهشمع در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع: الف) ۹-2/D=۲ (ج) ۲/D=۲ (حج)

Fig. 3- Approaching flow visualization to inclined piers for different geometries of pile group and top installation level of pile cap: a) Z/D=0, b) Z/D=1 and c) Z/D=2

اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بیبعد (*Ut/D*) ^۱۰۱×۳ و ^۱۰۱×۱ (۶۰ و ۲۲۰ دقیقه) در آرایش شمع ۲×۲ در حضور آستانه بالادست به ترتیب ۲۷/۵ تا ۸۳ و ۲۴/۵ تا ۳۲ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش مییابد. با افزایش ضخامت نسبی سرشمع به امار۱/۴۲ استقرار آستانه بالادست متوسط مقادیر اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی را برای قطرهای شمع مذکور و آرایش ۲×۲ در زمانهای بیبعد ^۱۰۱×۳ و ^۱۰۱×۱ به ترتیب در محدوده ۳۰ تا ۳۶ و ۲۵ تا ۳۲ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش میدهد. نتایج بـهدسـتآمـده از انـدازه گیری لحظـهای عمـق آبشسـتگی بـرای ضـخامتهای سرشـمع، آرایشهـای گروهشمع، قطرهای مختلف شمعها و ترازهـای کارگـذاری مختلف سرشمع در نمودارهـای شـکلهای ۴ تـا ۸ نشـان داده شده است. در این نمودارها، نمایـههای NS و US بـه ترتیب حالت بدون آستانه و بـا آسـتانهٔ بالادسـت را نشـان می دهند. مقایسهٔ مقادیر عمـق لحظـهای آبشسـتگی در تراز کارگـذاری سرشـمع = Z/D بـرای ضـخامت نسـبی سرشـمع (T_{pc}/D) ۵۸/۰ و قطرهـای نسـبی شـمع (d_p/D)



شکل ۴- توسعهٔ زمانی عمق حداکثر لحظهای أبشستگی برای هندسههای مختلف گروهشمع در شرایط تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۰=2/D (NS و US به ترتیب حالت بدون اُستانه و بااُستانهٔ بالادست)

Fig. 4- Temporal variation of maximum scour depth for different geometries of pile group and top installation level of pile cap Z/D=0

کاهش می یابد. به عبارت دیگر، با افزایش ضخامت سر شمع و به تبع آن افزایش قدرت گردابههای شکل گرفته در چالهٔ آبشستگی، نقش آستانه در کههش عمق آبشستگی محسوستر میشود. با تغییر تراز کارگذاری سر شمع به Z/D=۲، مساحت مقطع عبوری جریان از زیـر سرشمع افزایش می یابد. به عبارت دیگر فضای زیر سرشمع اجازه عبور بخش بیشتری از جریان نزدیک شونده به آن را می دهد. در نتیجه از قدرت گردابه های شکل گرفته اطراف شمعها كاسته مىشود. از اينرو روند تغييرات مقادير عمق آبشستگی با آنچه در تراز Z/D=۱ دیدهمی شود مشابه ولى مقدار عمق آبشستكى لحظهاى آن كمتر است. با اين همه، برای ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲ و قطر نسبی شمع ۸۵/۰۰، فضای عبوری جریان از زیر سرشمع محدودتر و میزان انسداد نرم (اثر انقباضی جریان در فضای بین شمعها و سرشمع) بیشتر می شود. در این شرایط، با افزایش قطر نسبی شمع و ضخامت نسبی سرشمع به صورت توام، جریان عبوری از فضای زیـر سرشـمع دچـار انقباض می شود و در اثر فشردگی گردابه های شکل گرفته، مقدار عمق آبشستگی افزایش می یابد.

با افزایش تراز نسبی کارگذاری سرشمع از -z/D = Vبه به علت امکان عبور جریان از فضای زیر سرشـمع Z/D=1نسبت به تراز نسبی •= Z/D و از بین رفـتن اثـر طوقـهای کــه سرشــمع در تــراز •=*Z/D* دارد، عمــق لحظــهای آبشستگی افزایش می یابد. مقایسهٔ مقادیر عمق لحظهای آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری سرشمع Z/D=۱ برای ضخامت نسبی سرشمع(T_{pc}/D) هطرهای نسبی شـمع (d_p/D) ۰/۵۷ و ۰/۵۵ نشـان داد متوسـط مقـادير اندازه گیری لحظه ای عمق آب شستگی در زمان های بی بعد ۳×۱۰^۴ (*Ut/D*) و ۲۲۰ (۶۰ و ۲۲۰ دقیقه) با استقرار آستانهٔ بالادست، در آرایش شـمع ۲×۲ در محـدودهٔ ۳۲ تـا ۴۷ و ۲۸ تا ۴۲ درصد و در آرایش شمع ۳×۲ به ترتیب در محدودهٔ ۲۹ تا ۴۶ و ۲۷ تا ۴۰ درصد کاهش می یابد. با افزایش ضخامت نسبی سرشمع به ۱/۴۲، متوسط مقادیر اندازه گیری لحظه ای عمق آبشستگی برای قطرهای شمع یادشده در زمانهای بیبعد مذکور در حضور آستانه بالادست، در آرایش شمع ۲×۲ به ترتیب در محدودهٔ ۲۹ تا ۴۱ درصد و ۳۳ تا ۳۹ درصد و با تغییر آرایش شـمعها بـه ۳×۲، به ترتیب در محدودهٔ ۳۴ تا ۳۷ و ۳۲ تـ ۳۴ درصد



Fig. 5- Temporal variation of maximum scour depth for different geometries of pile group and top installation level of pile cap Z/D=1

مطالعة أزمايشگاهي تأثير أستانة بالادست بر كاهش ابعاد چالة ...

سرشمع به ۱/۴۲ برای قطرهای شمع مذکور و آرایش شمعهای ۲×۲، متوسط مقادیر اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بیبعد یادشده برای آستانه بالادست به ترتیب در محدودهٔ ۳۲ تا ۴۰ و ۳۶تا ۳۹ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش مییابد. با افزایش آرایش شمعها از ۲×۲ به ۳×۲ نیز متوسط مقادیر لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بیبعد مذکور در حالت استقرار آستانهٔ بالادست به ترتیب در محدودهٔ ۳۰ تا ۳۲ و ۲۹ تا ۳۵ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کم میشود. مقایسهٔ مقادیر عمق لحظهای آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۲=*Z/D* برای ضخامت نسبی سرشمع (*T_{po}/D*) ۸۵/۰۰ آرایش شمعهای ۲×۲ و قطرهای نسبی شمع (*T_{po}/D*) ۱/۵۷ و ۸۵/۰ نشان داد متوسط مقادیر اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بیبعد (*Ut/D*) ۲۰۴×۳ و ۲۰۱×۱ (۶۰ و ۲۲۰ دقیقه) برای آستانهٔ بالادست به ترتیب در محدودهٔ ۴۲ تا ۶۶ و ۳۶ تا ۳۹ درصد و در آرایش شمعهای ۳×۲ به ترتیب در محدودهٔ ۴۱ تا ۴۳ و ۳۸ تا ۶۰ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش مییابد. با افزایش ضخامت نسبی



تراز نسبی کارگذاری سرشمع NS).Z/D=۲ و US و US به ترتیب حالت بدون اَستانه و بااَستانهٔ بالادست) Fig. 6- Temporal variation of maximum scour depth for different geometries of pile group and top installation level of pile cap Z/D=2

۴۰ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش مییابد. مقایسهٔ مقادیر عمق لحظهای آبشستگی برای ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲، قطرهای شمع مذکور و آرایش شمعهای ۲×۲ نشان داد که متوسط مقادیر اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بیبعد مذکور با استقرار آستانهٔ بالادست به ترتیب در محدودهٔ ۴۶ تا ۸۸ و ۵۸ تا ۴۹ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش مییابد. با افزایش آرایش شمعها از ۲×۲ به ۳×۲ نیز مقایسهٔ مقادیر عمق لحظهای آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۳=*Z/D* برای ضخامت نسبی سرشمع (*T_{po}/D*) ۸۵/۰۰ قطرهای نسبی شمع ۵۷/۰ و ۱۸۵/۰ و آرایش شمعهای ۲×۲ نشان داد متوسط مقادیر اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بی بعد اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بی بعد محدودهٔ ۴۱ تا ۶۸ و ۳۵ تا ۳۹ درصد و در آرایش شمعهای ۳×۲ به ترتیب در محدودهٔ ۴۱ تا ۴۴ و ۳۷ تا ۰/۸۵، میزان کاهش عمق آبشستگی با استقرار آستانه بالادست به ترتیب از ۴۷ درصد به ۳۴ درصد تغییر مییابد.

مقایسهٔ مقادیر عمق لحظهای آبشستگی برای تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۴=*//Z ضخامت* نسبی سرشمع (*T_{pc}/D*) ۸۵/۱۰، قطرهای نسبی شمع ۵۷/۱۰ و ۸۵/۱۰ و آرایش شمعهای ۲×۲ نشان داد متوسط مقادیر اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بی بعد اندازه گیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بی بعد ترتیب در محدودهٔ ۳۶ تا ۴۵ و ۳۹ تا ۴۵ درصد و در آرایش شمعهای ۳×۲ به ترتیب در محدودهٔ ۳۸ تا ۴۱ و آرایش شمعهای ۳×۲ به ترتیب در محدودهٔ ۲۸ تا ۴۱ و می یابد. متوسط مقادیر لحظ ای عمق آبشستگی در زمان های بی بعد یادشده برای آستانهٔ بالادست به ترتیب در محدودهٔ ۴۱ تا ۴۳ و ۳۴ تا ۴۵ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کم می گردد. همان طور که در منحنی های توسعهٔ عمق لحظهای آبشستگی دیده می شود، در ضخامت نسبی سرشمع ۸۵/۰۰، افزایش قطر نسبی شمعها تأثیر محسوسی ندارد و نمودار توسعهٔ عمق آبشستگی برای شرایط حضور ندارد و نمودار توسعهٔ عمق آبشستگی برای شرایط حضور محاکرد آستانهٔ بالادست در که هش می می افزایش ندارد و نمودار توسعهٔ عمق آبشستگی مرای شرایط خور مقابل جریان، اثر حضور شمعها بر عملکرد آستانهٔ بالادست در کاهش عمق آبشستگی محسوس تر است به گونهای که با افزایش قطر نسبی شمعها از ۲۵/۰ به



تراز نسبی کارگذاری سرشمع NS) Z/D=۳ و NS به ترتیب حالت بدون أستانه و باآستانهٔ بالادست)

Fig. 7- Temporal variation of maximum scour depth for different geometries of pile group and top installation level of pile cap Z/D=3

محدودهٔ ۴۶ تا ۵۰ و ۴۰ تـ ۴۱ درصد نسبت بـه حالت بدون آستانه کاهش می یابد. با افزایش آرایش شـمعها از ۲×۲ به ۳×۲ نیز متوسط مقادیر لحظهای عمق آب شستگی در زمان های بی بعد ۱۰۴×۳ و ۱۰۵×۱ برای شرایط استقرار آستانهٔ بالادست بـه ترتیب در محدودهٔ ۴۴ تـا ۴۶ و ۳۵ مقایسـهٔ مقـادیر عمـق لحظـهای آبشسـتگی بـرای ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲، قطرهـای شـمع مـذکور و آرایـش شـمعهای ۲×۲ نشـان داد کـه متوسـط مقـادیر اندازهگیری لحظهای عمق آبشستگی در زمانهای بیبعـد ۱۰۴×۳ و ۱۰×۱۰ بـرای آسـتانهٔ بالادسـت بـه ترتیـب در



تــا ۴۲ درصــد نســبت بــه حالــت بــدون آســتانه کم می شود.

Fig. 8- Temporal variation of maximum scour depth for different geometries of pile group and top installation level of pile cap Z/D=4

کاهش عمـق حـداکثر آبشستگی بـه میـزان ۲۶ درصـد شدهاست. با افـزایش ضـخامت نسـبی سرشـمع بـه ۱/۴۲، میزان انسداد جریان توسط اجـزای گروهپایـه کـج بیشـتر مـیشـود. مقایسـهٔ مقـادیر عمـق حـداکثر آبشسـتگی بـرای قطـر نسـبی شـمع ۲۵/۷ نشـان داد کـه در آرایـش شــمع ۲×۲ ، اســتقرار آســتانهٔ بالادســت عمـق مـداکثر آبشسـتگی را بـه میـزان ۲۴ درصـد کـاهش مـیدهـد و بـا افـزایش قطـر نسـبی شـمع بـه ۸۸/۷ در آرایـش ۲×۲، اسـتقرار آسـتانه منجـر بـه کـاهش عمـق حـداکثر آبشسـتگی بـه میـزان ۲۳ درصـد میشود.

ب) بررسی تأثیر استقرار آستانه بـر عمـق حـداکثر آبشستگی

در شکلهای ۹ و ۱۰ مقایسهٔ مقادیر عمق حداکثر آبشستگی برای شرایط هندسی سرشمع و شمعهای مختلف نشان داده شده است. مقایسهٔ مقادیر عمق حداکثر آبشستگی در تراز نسبی سرشمع ۰=Z/D برای ضخامت نسبی سرشمع (*dp/D*) ۸۵/۰ و قطر نسبی شمع (*dp/D*) نسبی سرشمع (*dp/D*) ۲۵/۰ و قطر نسبی شمع (*dp/D*) استانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی به میزان ۲۵ درصد کاهش مییابد. با افزایش قطر نسبی شمع به ۸۵/۰ نیز در آرایش شمعهای ۲×۲، استقرار آستانه منجر به



شکل ۹-مقایسهٔ عمق حداکثر أبشستگی در شرایط با و بدون أستانه در قطر نسبی شمع ۵۸/۵=*طp/D=+/۵۷* الف) ضخامت نسبی سرشمع ۲. (NS و US و Lpc/D=+/۸۵ و با أستانهٔ بالادست) مترسمع ۲.(D=۱/۴۲. (NS و US به ترتیب حالت بدون أستانه و با أستانهٔ

Fig. 9- Comparison of maximum scour depth for non-sill and upstream sill condition at relative pile diameter of $d_p/D=0.57$ a) relative pile cap thickness of $T_{pc}/D=0.85$ and b) relative pile cap thickness of $T_{pc}/D=1.42$



شکل ۱۰- مقایسهٔ عمق حداکثر نهایی آبشستگی در شرایط با و بدون آستانه در قطر نسبی شــمع ۵۸/۷=۰/D الـف) ضـخامت نسـبی سرشمع T_{pc}/D=۰/۸۵ و ب) ضخامت نسبی سرشمع NS).T_{pc}/D=1/۴۲ و NS) و US به تر تیب حالت بدون آستانه و باآستانهٔ بالادست) Fig. 10- Comparison of maximum scour depth for non-sill and upstream sill condition at relative pile diameter of dp/D=0.85 a) relative pile cap thickness of Tpc/D=0.85 and b) relative pile cap thickness of Tpc/D=1.42

درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش میدهد. با افزایش قطر نسبی شمع به ۸۵/۰ در آرایش ۲×۲، استقرار آستانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۳۰ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش میدهد. در آرایش شمعهای ۳×۲ در قطر نسبی شمعهای مذکور، حضور آستانه منجر به کاهش عمق حداکثر آبشستگی به میزان ۳۲ درصد نسبت به حالت بدون آستانه می شود. با افزایش ضخامت نسبی سرشمع به ۲/۲ا= T_{pc}/D . برای قطر نسبی شمع ۵۷/۰ و آرایش شمعهای ۲×۲، حضور آستانهٔ بالادست مقدار عمق حداکثر آبشستگی را به مقایسهٔ مقادیر عمق حداکثر آبشستگی در تراز نسبی سرشمع ۱=*Z/D* نشان داد که برای ضخامت نسبی سرشمع ۱/۵۷ (*dp/D*) ۲۵/۰۰و آرایش ۲×۲، استقرار آستانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۳۳ درصد کاهش میدهد. با افزایش تعداد شمعها در راستای جریان به دلیل بههم فشردگی گردابهها در فضای بین شمعها میزان عمق حداکثر آبشستگی نسبت به آرایش شمع ۲×۲ به میزان ۱۱ درصد افزایش مییابد. در آرایش شمع ۳×۲، استقرار

میزان ۲۸ درصد کاهش میدهد. در آرایش شمعهای ۳×۲ نیز حضور آستانه بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۲۳ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کم میکند. برای قطر نسبی شمع ۸۵/۰ در آرایش شمعهای ۲×۲، استقرار آستانهٔ بالادست به کههش عمق حداکثر آبشستگی به میزان ۳۱ درصد میانجامد. مقایسهٔ نتایج بهدستآمده همچنین حاکی از آن است که در آرایش شمعهای ۳×۲، حضور آستانه عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۲۷ درصد کاهش میدهد.

با تغییر تراز کارگذاری سرشمع به ۲=2/D برای ضخامت نسبی سرشمع ۰/۸۵ در قطر نسبی شمع ۰/۵۷ و آرایـش شـمعهای ۲×۲، عمـق حـداکثر آب شسـتگی بـا استقرار آستانهٔ بالادست ۳۴ درصد کاهش می یابد. با تغییر آرایش شمعها به ۳×۲، عمق حداکثر آبشستگی به میزان ۲۸ درصد کم می شود. با افزایش قطر نسبی شمع به ۸۵/۰ در آرایش شمعهای ۲×۲، استقرار آستانه منجر به کاهش عمق حداکثر آبشستگی به میزان ۳۱ درصد میشود. در آرایـش شـمعهای ۳×۲، حضـور آسـتانهٔ بالادسـت عمـق حداکثر آبشستگی را به میزان ۳۲ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش میدهد. با افزایش ضخامت نسبی سرشمع از ۰/۸۵ به ۱/۴۲ برای قطر نسبی شـمع ۰/۵۷ در آرایشهای ۲×۲ ، مقدار عمق حداکثر آبشستگی در حضور آستانهٔ بالادست به میزان ۳۲ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کم می شود. با تغییر آرایش شمعها به ۳×۲ نیز حضور آستانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۲۸ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کم میکند. بـرای قطـر نسـبی شـمع ۰/۸۵ در آرایـش ۲×۲، اسـتقرار آستانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۳۶ درصـد کـاهش مـیدهـد. در آرایـش شـمعهای ۳×۲، حضور آستانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میرزان ۳۴/۵ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش میدهد.

مقایسهٔ نتایج به دست آمده از عمق حداکثر آبشستگی در تراز کارگذاری سرشمع Z/D=۳ نشان می-دهد در ضخامت نسبی سرشمع ۰/۸۵، قطر نسبی شمع ۰/۵۷ و آرایش شمعهای ۲×۲، عمق حداکثر آبشستگی در حضور آستانه ۳۷ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش می یابد. با تغییر آرایش شمع ها از ۲×۲ به ۳×۲، عمق حداکثر آبشستگی در حضور آستانه ۳۶ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کـاهش می یابـد. بـرای قطـر نسبی شمع ۰/۸۵ در آرایش ۲×۲، استقرار آستانهٔ بالادست به کاهش عمق حداکثر آبشستگی به میزان ۳۳ درصد میانجامد. با تغییر آرایش شمعها به ۳×۲، حضور آستانه منجر به کاهش عمق حداکثر آبشستگی به میزان ۳۳ درصد نسبت به حالت بدون آستانه می شود. با افزایش ضخامت نسبی سرشمع به ۱/۴۲ برای قطر نسبی شمع ۰/۵۷ و آرایش شمع ۲×۲، مقدار عمق حداکثر آبشستگی با حضور آستانهٔ بالادست به میزان ۳۴ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش می یابد. در آرایش شمع ۳×۲ نیز استقرار آستانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۳۵ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش میدهد. بـرای قطـر نسـبی شـمع ۰/۸۵ در آرایـش ۲×۲، استقرار أستانة بالادست باعث كاهش عمق حداكثر آبشستگی به میزان ۳۷ درصد می شود. در آرایش شمعهای ۳×۲، حضور آستانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۳۵ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کم میکند.

استقرار آستانه بر کاهش عمق آبشستگی در تراز کارگذاری سرشمع ۴=Z/D نشان داد که در ضخامت نسبی سرشمع ۸۵/۰۰، قطر نسبی شمع ۵۷/۰ و آرایش شمعهای ۲×۲، عمق حداکثر آبشستگی در حضور آستانه بالادست ۳۷ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش مییابد. با تغییر آرایش شمع ها از ۲×۲ به ۳×۲، حضور آستانه عمق حداکثر آبشستگی را به مقدار ۳۶ درصد

در طرحهای حفاظت از پلها، علاوه بر عمق حداکثر آبشستگی، آگاهی از ابعاد چاله نیز با اهمیت است. در شکلهای ۱۱ تا ۱۵، نمونههایی از توپوگرافی آبشستگی در اطراف پایههای پل برای رقوم کارگذاری مختلف نشان دادہ است. بەطور كلى مىتوان گفت حضور آستانة بالادست منجر به افزایش عرض چالهٔ آبشستگی میشود. در این شرایط بهدلیل تمرکز گردابههای شکلگرفته در چالهٔ آبشستگی، توسعهٔ عرضی چاله آبشستگی بیشتر خواهدشد. مقايسة نتايج بهدستآمده نشان ميدهـد طـول چالهٔ آبشستگی همبستگی نزدیکی با عمـق آبشسـتگی دارد و با کاهش آن، مقدار آن نیز کاهش می یابد. در تراز کارگذاری سرشمع ·=D/2 طول متوسط آبشستگی ۵/۳ برابر عمق محاسبه شد و عرض متوسط آبشستگی ۲ برابر عمق آبشستگی بهدست آمد. برای آرایشهای مختلف گروه شهم، ضخامت های نسبی مختلف سر شهع و قطرهای مختلف شمعها، حضور آستانهٔ بالادست طـول چالـهٔ آبشسـتگی را بـهطور متوسـط ۱۷/۵ درصـد کاهش میدهد.

کاهش میدهد. برای قطـر نسـبی شـمع ۸۵/۰ در آرایـش ۲×۲، استقرار آستانهٔ بالادست منجر به کاهش عمق حـداکثر آبشسـتگی بـه میـزان ۳۵ درصـد میشـود. در آرایـش شـمعهای ۳×۲، حضـور آسـتانهٔ بالادسـت عمـق حداکثر آبشستگی را به میزان ۳۴ درصد نسبت به حالت بدون أستانه كم ميكند. با افزايش ضخامت نسبي سرشمع از ۰/۸۵ بـه ۱/۴۲ در قطـر نسـبی شـمع ۰/۵۷ و آرایش شـمع ۲×۲، مقـدار عمـق حـداکثر آبشسـتگی در حضور آستانهٔ بالادست ۳۷ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کاهش می یابد. با تغییر آرایش شمع از ۲×۲ به ۳×۲، حضور آستانهٔ بالادست عمق حداکثر آبشستگی را به میزان ۳۸ درصد نسبت به حالت بدون آستانه کم می-کند. برای قطر نسبی شمع ۰/۸۵ در آرایش ۲×۲، اسـتقرار آستانهٔ بالادست به کاهش عمق حداکثر آبشستگی به میزان ۴۰ درصد می انجامد. در آرایش شمعهای ۳×۲، حضور آستانهٔ بالادست منجر به کاهش عمق حداکثر آبشستگی به میزان۳۶ درصد نسبت به حالت بدون آستانه مىشود.



شکل ۱۱- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی در تراز کارگذاری نسبی سرشمع ۰= Z/D برای ضخامت نسبی سرشمع ۸۵/۰، قطر نسبی شمع ۵۷/+ و آرایش شمعهای ۲×۲ در شرایط: الف) بدون آستانه، ب) باآستانهٔ بالادست

Fig. 11- Topography of final scour depth at top installation of pile cap Z/D=0 for relative pile cap thickness of 0.85, relative pile diameter of 0.57 and piles arrangement of 2*2: a) None sill condition and b) upstream sill



در تراز کارگذاری سرشمع Z/D=۱ نشان داده شـده اسـت آبشستگی در شرایط نبود آستانه ۱/۸ و با استقرار آستانهٔ كه متوسط نسبت بعد طولي چالـهٔ آبشسـتگي بـه عمـق بالادست به ۲ تغيير مييابد. متوسط نسبت عـرض چالـهٔ مطالعة أزمايشگاهي تأثير أستانة بالادست بر كاهش ابعاد چالة ...

شکل گرفته در گودال آبشستگی امکان توسعهٔ عرضی بیشتر گردابهها بهتدریج به تراز پایین تر از بستر اولیهٔ رسوبی منتقل و از مقدار توسعهٔ عرضی آنها کاسته می شود. آبشستگی به عمق آبشستگی برای شرایط نبود آستانه و حضور آستانهٔ بالادست در محدودهٔ ۲/۸ تا ۵/۴ حاصل شـد. همـانطور کـه اشـاره گردیـد، بـهدلیل کـاهش عمـق آبشستگی در شرایط حضور آستانهٔ بالادست، گردابـههای



شکل ۱۲− توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی در تراز کارگذاری نسبی سرشمع ۱= Z/D برای ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲، قطر نسبی شمع ۸۵/۰ و آرایش شمعهای ۳×۲ در شرایط: الف) بدون آستانه، ب) با آستانهٔ بالادست

Fig. 12- Topography of final scour depth at top installation of pile cap Z/D=1 for relative pile cap thickness of 1.42, relative pile diameter of 0.85 and piles arrangement of 2*3: a) None sill condition and b) upstream sill
مقایسهٔ نتایج بهدستآمده در تراز کارگذاری سرشمع به طور متوسط ۵/۵۲ درصد که هش میده. همچنین،
۲/D=۲ نشان داد که برای آرایشهای مختلف گروه شمع، متوسط نسب عرض چالهٔ آب شستگی به عمق آب شستگی
ضخامتهای نسبی مختلف سرشمع و قطرههای مختلف
۲/۵ می دو استانه و با آستانهٔ بالادست به ترتیب از شمعها، حضور آستانهٔ بالادست طول چالهٔ آب شستگی را ۲/۵ به ۷ تغییر می کند.



شکل ۱۳- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی در تراز کارگذاری نسبی سرشمع ۲= Z/D برای ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲، قطر نسبی شمع ۸۵/۰ و آرایش شمعهای ۳×۲ در شرایط: الف) بدون آستانه، ب) باآستانهٔ بالادست

Fig. 13- Topography of final scour depth at top installation of pile cap Z/D=2 for relative pile cap thickness of 1.42, relative pile diameter of 0.85 and piles arrangement of 2*3: a) None sill condition and b) upstream sillمقایسهٔ نتایج بهدستآم.دهنشان داد در تراز کارگذاریعرض چالهٔ آبشستگی به عمق آبشستگی در حالتمقایسهٔ نتایج بهدستآم.دهنشان داد در تراز کارگذاریعرض چالهٔ آبشستگی به عمق آبشستگی در حالتسرشمع ۲/۸ با ایجاد آستانهٔ بالادست از ۲/۸ به ۶ تغییر

میکند. برای آرایش های مختلف گروه شمع، ضخامت های آستانهٔ بالادست طول چالهٔ آب شستگی را بـ مطور متوسط نسبی مختلف سر شمع و قطر های مختلف شمع ها، حضور ۲۷ در صد کاهش می دهد.



مسکل ۲۰۱۰ و توپو کرانی بستر کهایی اجلسستگی در کرار کاری کسیبی سرسمع ۲۰ 20 برای طلحمت کسیبی سرسمع ۲۰۱۱، قطر نسبی شمع ۸۵/۰ و آرایش شمعهای ۳×۲ در شرایط: الف) بدون آستانه، ب) با آستانهٔ بالادست

Fig. 14- Topography of final scour depth at top installation of pile cap Z/D=3 for relative pile cap thickness of 1.42, relative pile diameter of 0.85 and piles arrangement of 2*3: a) None sill condition and b) upstream sill

نتایج آزمایشها نشان داد که برای آرایشهای مختلف گروهشمع، ضخامتهای نسبی مختلف سرشمع و قطرهای مختلف شمعها در تراز کارگذاری سرشمع ۲=Z/D حضور آستانه طول چالهٔ آبشستگی را بهطور متوسط ۲۸ درصد کاهش میدهد. مقایسهٔ ابعاد طولی و عرضی گودال



قطر نسبی شمع ۸۵/۰ و آرایش شمعهای ۳×۲ در شرایط: الف) بدون آستانه، ب) با آستانهٔ بالادست

Fig. 15- Topography of final scour depth at top installation of pile cap Z/D=4 for relative pile cap thickness of 1.42, relative pile diameter of 0.85 and piles arrangement of 2*3: a) None sill condition and b) upstream sill

نتيجهگيري

در تحقیق حاضر تأثیر کارگذاری آستانهٔ بالادست بر توسعهٔ زمانی و عمق حداکثر آبشستگی اطراف گروهیایه کج مستقر روی سرشمع در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. مقایسهٔ نتایج بهدستآمده نشان داد که در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ·=V/D بهترين عملكرد آستانهٔ بالادست در ضخامت نسبی سرشمع ۰/۸۵، قطر نسبی شمع ۰/۸۵ و آرایش شمعهای ۲×۲ با کاهش ۲۶ درصد و ضعیفترین عملکرد آسـتانه در ضـخامت نسـبی سرشـمع ۱/۴۲، قطـر نسبی ۸۵/۰ و آرایش شمعهای ۲×۲ با کاهش ۲۳ درصد حاصل شدهاست. در تراز نسبی کارگذاری سرشمع . Z/D=۱، بیشترین عملکرد در کاهش آبشستگی با ۳۳ درصد مربوط به ضخامت نسبی سرشمع ۰/۸۵، قطر نسبی شـمع ۰/۵۷ و آرایـش شـمعهای ۲×۲ و کمتـرین مقـدار کاهش آبشستگی با ۲۳ درصد مربوط به ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲، قطر نسبی ۵۷/۰۷ و آرایش شمعهای ۳×۲ است. در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۲=2/D بیشـترین مقدار کاهش آبشستگی با ۳۶ درصد مربوط به ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲، قطر نسبی شمع ۰/۸۵ و آرایش شمعهای ۲×۲ و کمترین مقدار کاهش آبشستگی با ۲۸

درصد مربوط به ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲، قطر نسبی ۲۵/۲ و آرایش شمعهای ۳×۲ بهدستآمده است. با تغییر تراز نسبی کارگذاری سرشمع به ۳=*D/Z* مناسبترین عملکرد در کاهش آبشستگی با ۳۸ درصد مربوط به ضخامت نسبی سرشمع ۸۵/۱۰، قطر نسبی شمع ۵۷/۲ و آرایش شمعهای ۲×۲ و کمترین مقدار کاهش آبشستگی با ۳۲ درصد مربوط به ضخامت نسبی سرشمع ۸۵/۱۰، قطر نسبی ۸۵/۱۰ و آرایش شمعهای ۳×۲ است. در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۴=*D/Z* بیشترین مقدار کاهش آبشستگی با ۴۰ درصد مربوط به ضخامت نسبی سرشمع ۱/۴۲، قطر نسبی شمع ۵۵/۱۰ و آرایش شمعهای ۲×۲ و معترین مقدار کاهش آبشستگی با ۳۴ درصد مربوط به ضخامت نسبی سرشمع ۸۵/۱۰ و آرایش شمعهای ۲×۲ و

با کارگذاری آستانه، طول چالهٔ آبشستگی کاهش یافت ولی به دلیل تمرکز گردابههای شکل گرفته در چالهٔ آبشستگی توسط آستانه و ناممکن بودن عبور آن به پاییندست، عرض چالهٔ آبشستگی از مقدار متوسط ۲/۷ برابر عمق آبشستگی در شرایط بدون آستانه به ۶/۵ برابر عمق آبشستگی در شرایط استقرار آستانه بالادست افزایش یافت.

مراجع

- Ataie-Ashtiani, B. & Beheshti, A. A. (2006). Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. ASCE, J.Hydraul. Eng, 132(10), 1100-1104.
- Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z. & Beheshti, A. A. (2010). Experimental investigation of clearwater local scour of compound piers. *ASCE, J. Hydraul. Eng*, *136*(6), 343-351.
- Amini, A., Melville, B., Ali, T. M. & Ghazali, A. H. (2012). Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow. ASCE, J. Hydraul. Eng, 138(2), 177-185.
- Breusers, N.H.C. & Raudkivi, A.J. (1991). Hydraulic structure design manual: scouring. IAHR design manual, Vol. 2, pp: 152, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Esmaeili Varaki, M. & Saadati Pacheh Kenari, S. (2016). Experimental investigation of effect of installation of group piers on foundation on scour depth around bridge piers. *Journal of water and soil science*, *24*(3), 27-39.

- Esmaeili Varaki, M., Mousapour, S. & HatamJafari, M. (2014). Experimental investigation of the effect of geometric and hydraulic conditions on Scour Around Inclined Bridge Piers Group. *Iranian Water* Research *Journal*, *13*, 141-151.
- Esmaeili Varaki, M., Radice, A., Hossini, S.S. & Fazl Ola, R. (2019). Local scour at a complex pier with inclined columns footed on capped piles: effect of the pile arrangement and of the cap thickness and elevation. ISH Journal of Hydraulic Engineering, https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1702109.
- Ferraro, D., Tafarojnoruz, A., Gaudio, R. & Cardoso, A. (2013). Effects of pile cap thickness on the maximum scour depth at a complex pier. *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, *139*(5), 482-491.
- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. & Cardoso, A. (2009). Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill. ASCE, J. Hydraul. Eng., 135(1), 13–21.
- Lagasse, P. F., Clopper, P. E. & Zevenbergen, L. W. (2009). Impacts of debris on bridge pier scour. 33rd IAHR Congress. Vancouver, 3967–3974.
- Melville, B.W. & Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers, ASCE, J. Hydraul. Eng, 125 (1), 59-65.
- Melville, B. W. & Sutherland, A. J. (1988). Design method for local Scour at bridge piers. ASCE, J. Hydraul. Eng, 114(10), 1210-1226.
- Moreno, M., Maia, R. & Couto, L. (2015). Effects of relative column width and pile-cap elevation on local scour depth around complex piers. ASCE, J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001080, 04015051.
- Moreno, M., Maia, R., Couto, L. & Cardoso, A. H. (2016). Subtraction approach to experimentally assess the contribution of the complex pier components to the local scour depth. ASCE, J. Hydraul. Eng, 10.1061/(ASCE) HY.1943-7900.0001270, 06016030.
- Pagliara, S., Carnacina, I. & Cigni, F. (2010). Sills and gabions as countermeasures at bridge pier in presence of debris accumulations. *Journal of Hydraulic Research*, 48(6), 764-774.
- Raudkivi A.J. & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *ASCE, J. Hydraul. Eng*, 109(3), 339-350.
- Richardson, E.V. & Davis, S. R. (2001). Evaluating scour at bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18). Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Saadati Pachekenari1, S.S., Esmaeili Varaki, M. & Fazl Ola, R. (2014). Experimental investigation of effect of sill location on local scour around inclined bridge piers group. *Journal of water and soil science*, 28(2), 406-419.
- Salim, M. & Jones, J. S. (1996). Scour around exposed pile foundations. North American Water and Environment Congress 96. Anaheim. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. CAUS: 335-346.
- Sumer, B. M., Bundgaard, K. & Fredsoe, J. (2005). Global and local scour at pile group. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 15(3), 204-209.
- Tafarojnoruz, A., Gaudio. R. & Calomino, F. (2012). Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier Scour. ASCE, J. Hydraul. Eng. 138(3), 297-305.
- Wang, H., Tang, H., Liu, Q. & Wang, Y. (2016). Local scouring around twin bridge piers in open-channel flows. ASCE, J. Hydraul. Eng. 10.1061/ (ASCE) HY.1943-7900.0001154, 06016008.
- Zarrati, A., Gholami, H. & Mashahir, M. B. (2004). Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers, *ASCE*, *J. Hydraul. Eng*, *42*(1), 97-103.

مطالعهٔ أزمایشگاهی تأثیر أستانهٔ بالادست بر کاهش ابعاد چالهٔ ...

- Zarrati, A., Nazariha, M. & Mashahir, M. B. (2006). Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *ASCE, J. Hydraul. Eng, 132*(2), 154-162.
- Zhao, G. & Sheppard, D. M. (1998). The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups. Compilation of Conf. Scour Papers, ASCE, Reston, VA, 377-391.



Irrigation and Drainage Structures Engineering Research/Vol.21/No.80/ Autumn 2020/P: 37-60

Research Paper

Experimental Investigation of Effect of Upstream Sill on Reduction of the Local Scour Hole around Complex Piers

N. Tavazo, M. Esmaeili Varaki* and A. Malekpour

* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Water Engineering, Department of Water and Environmental Engineering, Caspian Sea Basin research Center, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: esmaeili@Guilan.ac.ir, esmaeili.varaki@yahoo.com Received: 10 January 2020, Accepted: 20 June 2020

Extended Abstract

Intorduction

Bridges are one of the main components of the transportation. One of the main causes of bridges failure, especially during flood times, is the development of scour depth near and below the pier and its foundation. Therefore, protecting the pier from scouring is an important issue in the safety of bridges at design stage (Richardson & Davis, 2001). Regarding to the importance of scour around the bridge piers, many studies have been conducted on understanding of governing process and estimation of the scour depth around bridge pier. Although many literatures have been documented for single pier but due to geotechnical and economical reasons, multiple-pile bridge piers and complex piers have become popular in bridge design and have attracted interest of researchers (Ataie-Ashtiani and Beheshti 2010).

Due to the importance of reduction of scour around the bridges, different countermeasures have been introduced and evaluated in the literature. In general, the countermeasures against pier scour are broadly classified into two categories: (1) flow-altering countermeasures, and (2) bed-armoring countermeasures (Tafarojnoruz et al., 2012). The scour process is expected to become particularly complicated around inclined bridge piers that based on a pile cap supported by array of piles, due to the interaction of the flow hydrodynamic with all the geometric elements. Therefore, more research is needed on scour morphology and countermeasures, the aim of this study is to investigate the effect of upstream sill location on local scour dimension around inclined bridge pier in case of buried and exposed pile cap with different thickness, pile diameters and arrangements.

Experimental Setup and procedure

The scour experiments for the present study were carried out at the hydraulic and physical hydraulic modeling lab of the University of Guilan, Rasht, Iran, using a rectangular recirculation flume that was 8.4 m long, 0.89 m wide and 1 m deep. The walls and bed of the flume were made of glass and iron panels, respectively. In order to supply the flow rate, a centrifuge pump, which can provide a flow rate of up to 70 l/s was used. The bridge pier consists of two rectangular piers with 2.5 and 3.5 cm dimensions which

mounted at an angle of 28 degrees on a pile cap with 10 cm width, 16 cm length, 3 and 5cm thickness which placed on an array of 2×2 and 2×3 piles with different diameters. The experiments were performed for relative flow depth (*y/D*) 6.42, relative pile cap levels (*Z/D*) 0, 1, 2, 3, 4, relative pile diameter levels (*d_p/D*) 0.57 and 0.85 in clear water conditions. The bed sill consists of a Plexiglas with thickness of 0.06 m, width of 0.89 m and height of 0.3 m which was mounted vertically at the upstream of pile cap.

The sediments used in this study had a uniform diameter of 0.7 mm made to avoided effects of sediment coarseness as. A recess section, 1.5 m long and 0.3 m deep, was filled with uniform sand. To ensure that the flow developed before reaching the bridge pier, its location was chosen 5 meters from the entrance.

The experimental campaign of the present study was run in clear-water, near-threshold conditions. Based on the estimation of U_c , the U/U_c ratio was kept at a value of 0.95 in all experiments. An experiment was first performed for 72 hours with relative velocity (U/U_c) of 0.95 and temporal evolution of the maximum scour depth at front of pier was measured using a point gauge with an accuracy of \pm 0.1 mm to estimate equilibrium time scour depth. Comparison of the results showed that after 24 hours from the beginning of the experiment, the scour depth variations became less than 5% of the pier diameter. Therefore, the equilibrium time for all experiments was considered 24 hours in each experiment, scour depth values were frequently collected for 7 hours. A further point was taken on the next day (, corresponding to a duration of 25 hours. At this duration, the topography of the scour hole was surveyed using a laser distance sensor with an accuracy of ± 1 mm. A total of 72 runs was performed under different geometric values of the pile cap T_{pc} , the pile diameter d_p , the number of piles in a row *N*, the elevation of the pile cap *Z* for none sill and upstream sill conditions.

Results and Discussion

Comparison of results showed that for Z/D=0, the value of average scour depth in non-dimensional times $(Ut/D) \ 3\times10^4$ and $10^5(60$ and 220 minutes) for $d_p/D=0.57$ and $d_p/D=0.85$, installation of upstream sill reduced scour depth in range of 27.5 to 38 and 34.5 to 32 percent, respectively. Comparisons showed that by increasing top level installation of pile cap from Z/D=0 to Z/D=1, the mean reduction of scour depth by upstream sill at references times was in range of 29 to 47 percent in comparison with no sill condition. Comparison of results for Z/D=2 showed that by installation of upstream sill the temporal scour depth decreased in range of 28 to 47 percent. Experimental observation showed that as approaching flow could pass through pile array, increase of pile cap thickness and pile diameter, reduced performance of upstream sill on reduction of scour depth due to contracting down flow, which pass over beneath of the pile cap.

By increasing top level installation of the pile cap to Z/D=3, installation of the sills reduced the temporal sour depth at reference time in range of 29 to 46 percent. Comparison of results indicated that at the relative pile cap thickness of 0.85, increase the diameter and number of the piles did not noticeable effect on performance of upstream sill but by increase the relative pile cap thickness to 1.42, any change of pile arrangement and increase of pile diameter led to change performance of upstream sill. Trend of curves of temporal variation of scour depth for Z/D=4 are similar to for Z/D=3. At that top-level installation of the pile cap, performance of upstream sill on reduction of scour depth was in range of 36-45 percent. Comparison of the results for pile cap installation level of Z/D=0 showed that the installation of upstream

sill reduced the mean value of the maximum scour depth at different thickness of pile cap and pile geometries in range of 23- 25 percent approximately. For Z/D=1, the upstream sill leads to decrease the maximum scour depth on average 27-33 percent, approximately. For Z/D=2, the upstream sill leads to decrease the maximum scour depth on average 28-36 percent, approximately. By increase the top installation of pile cape to Z/D=3 and 4, the upstream sill leads to decrease the maximum scour depth on average 33-37 and 36-38 percent, approximately.

Conclusion

By construction of bridges in rivers, the pattern of approaching flow changes in the vicinity of structures and local scour occurs. In case of insufficient level of pile caps during the design and construction period, the bridge will be failed especially during the flood event. In this research, the effect of the upstream sill on time development and maximum scour depth around inclined bridge pier group was investigated for different pile cap thicknesses, top level installation of pile caps, array and diameter of piles.

Comparison of the results indicated that at the level of Z/D = 0, by installation of sill at upstream of pile cap, the maximum scour depth decreases 24.5 percent. At the top installation of pile cap of Z/D = 1, the maximum scour depth decreases 29 percent of sill installation location at upstream of pile cap. At the level of Z/D = 2, by installation of sill at upstream of pile cap, the maximum scour depth decreases 32.5 percent. At the top installation of pile cap of Z/D = 3, the maximum scour depth decreases 35 percent of sill installation location at upstream of pile cap. At the level of Z/D = 4, by installation of sill at upstream of pile cap. At the level of Z/D = 4, by installation of sill at upstream of pile cap, the maximum scour depth decreases 36.8 percent. Comparison of results indicated that installation of upstream sill length of scour hole decreased 26 percent approximately. However, width of scour hole increased 2-3 times of corresponding scour width of non-sill conditions.

Keyword: Complex Piers, Pile Array, Scour, Sill, Top-level Installation of Pile Cap.