ارزیابی و مقایسه روش‌های حفاظت از پایه‌ها و کوله‌های پل‌ها در برابر آبشستگی موضعی

مقاله علمی – پژوهشی

امیر محجوب، استادیار، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
فواد کیلانه‌ئی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲– پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵
صفحه ۳۰-۱۳

چکیده

یکی از مهمترین دلایل عدم پایداری و تخریب پل‌های رودخانه ای، وقوع آبشستگی در اطراف پایه‌ها و کوله‌های آن در زمان وقوع سیلاب است. مسئله آبشستگی موضعی در سالهای اخیر بطور گسترده ای توسط محققین مختلف بررسی شده است که نتیجه آن ارائه روشهای مختلف برای کنترل آبشستگی نظیر استفاده از سنگ‌چین، گابیون، طوق، بلوک‌های بتنی، ساخت ریزشمع‌ها در جلوی پایه، ایجاد شکاف در پایه، استفاده از کابل، صفحات مستغرق، صفحات هدایت کننده سطحی و اصلاح شکل پایه بوده است. در این مقاله ضمن معرفی و بررسی مطالعات انجام شده بر روی انواع روش‌های مقابله با آبشستگی، از منظر کاربردی و اجرایی، استفاده از سنگ‌چین، بلوک‌های بتنی، گابیون و احداث رادیه و برید که از راهکارهای موجود و رایج برای کاهش عمق آبشستگی در حالت وجودِ پی‌های سطحی و نیمه سطحی (پی‌های فاقد شمع) در کوله و پایه پل‌های واقع در رودخانه‌ها می‌باشند، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. تمامی روش‌های مذکور در دسته روش‌های مقاوم کننده بستر در مقابل تنش برشی ناشی از عبور جریان در سطح مشترک سیال و خاک، قرار می‌گیرند. نکات طراحی و اجرایی در هر مورد ارایه گردیده و مزایا و معایب هر کدام از روش‌ها بیان شده است. در نهایت نیز با عنایت به شرایط مختلف رودخانه و سازه پل، مناسب‌ترین حالت به لحاظ اجرایی، اقتصادی و نگهداری پیشنهاد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: مقاوم‌سازی بستر، پل‌های رودخانه‌ای، تثبیت، آبشستگی، پی‌سطحی

۱-مقدمه

پل‌ها یکی از مهمترین اجزاء راه هستند و نقش اساسی در برقراری ارتباط بین جاده‌ها را دارند. هزینه اولیه صرف شده برای احداث پل‌ها صرفاً در صورت حفظ عملکرد بلند مدت و عمر مفید طولانی آنها توجیه‌پذیر است. این موارد برای پل‌های رودخانه‌ای بدلیل پیچیدگی‌های اندرکنش جریان آب، سازه پل و خاک بستر رودخانه از اهمیت بیشتری برخوردار است. نکته قابل توجه این است که عامل اصلی تخریب پل‌ها در سطح جهان مسایل هیدرولیکی است (Wardhana and Hadipriono, 2003). در ایران نیز عمده تخریب پل‌ها ناشی از سیلاب است. در بارش‌های رخداده در اواخر اسفند ۱۳۹۷ و فروردین ۱۳۹۸ تعداد زیادی از پل‌های رودخانه‌ای تخریب شدند و آسیب‌های زیادی به زیرساخت‌های کشور وارد شد(غلامی و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین آشنایی و استفاده از روش‌های کارآمد که به مقاوم‌سازی پل‌های رودخانه‌ای در برابر سیلاب کمک کنند، بسیار حایز اهمیت خواهد بود. روش‌های مذکور عمدتا به دو دسته تقسیم می‌گردند. دسته اول

روش‌هایی هستند که به اصلاح خطوط جریان در محل پل کمک می‌کنند و بدین ترتیب تنش‌های برشی ناشی از حرکت سیال در اطراف المان‌های سازه‌ای کاهش یافته و به عبور ایمن جریان از محل پل کمک می‌کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از دیوار هدایت آب، استفاده از آبشکن‌ها، استفاده از شمع‌های محافظ و ... اشاره کرد. دسته دوم روش‌هایی است که آسیب‌پذیری پل در مقابل سیلاب به کمک مسلح کردن المان‌های سازه‌ای با مصالح مقاوم، بهبود می‌یابد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از سنگچین، بلوک‌های بتنی، گابیون، رادیه و برید و ... اشاره کرد. هر کدام از موارد مطرح شده مزایا و معایبی دارند که در انتخاب طرح بهینه برای هر مورد خاص موثر هستند. مزیت بسیار مهم استفاده از روش‌های بیان شده در دسته دوم، در این است که المان‌های سازه‌ای پل و مقاوم کنندگان آن‌ها در کنار یکدیگر احداث شده و خرابی‌های ایجاد شده در آن‌ها در مراحل بازرسی از المان‌های سازه‌ای مشخص شده و به تبع آن هشدارهای لازم جهت رفع عیوب احتمالی داده خواهد شد. در این مقاله به بررسی چند مورد از مهمترین روش‌هایی که در قالب دسته دوم طبقه‌بندی می‌گردند، پرداخته خواهد شد و تحلیلی از مزایا و معایب هر کدام ارائه خواهد شد.

۲-پیشینه تحقیق

با گذر زمان و تخریب پل‌های متعدد در اثر سیلاب، علل هیدرولیکی شکست پل مورد توجه محققین قرار گرفت. عرض ناکافی دهانه آبرو در محل پل، تجمع آشغال (انباشت نخاله‌ها و آشغال‌ها و تنه و شاخ وبرگ درختان)، برداشت غیراصولی مصالح رودخانه‌ای و آبشستگی از مهمترین علل هیدرولیکی شکست پل هستند(Hamill, L., 2004). نکته قابل توجه این است که عمدتاً موارد مطرح شده در نهایت تحت مکانیسم آبشستگی منجر به تخریب و آسیب به پل می‌گردد. بنابراین می‌توان آبشستگی را مهمترین دلیل هیدرولیکی شکست پل‌های رودخانه‌ای دانست. روشهای مختلفی برای کنترل و کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل‌ها توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از سنگ‌چین، طوق، ساخت ریزشمع‌ها در جلوی پایه، ایجاد شکاف در پایه، استفاده از کابل، صفحات مستغرق، اصلاح شکل پایه و ... اشاره کرد. همانگونه که عنوان شد، روش‌های مذکور به‌طور کلی در قالب اقداماتی برای افزایش مقاومت مواد تشکیل‌دهنده بستر یا اصلاح الگوی جریان در راستای کاهش قدرت عوامل فرسایش و یا ترکیبی از هر دو حالت خواهد بود (Beg, M. and Beg, S., 2013). در نشریه "راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل" به شماره ۲۶۰ که در سال ۱۳۸۱ توسط معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی نهاد ریاست جمهوری منتشر شده است، انواع مختلف آبشستگی در محدوده پایه‌های پل در چند بخش مورد بررسی قرار گرفته و عوامل موثر در وقوع آبشستگی‌های ناشی از تنگ‌شدگی و موضعی و نقش الگوهای مختلف فرسایش در گودافتادگی اطراف پایه‌ها معرفی شده است. نهایتاً روش‌های مختلف تعیین عمق آبشستگی بنا به توصیه و تجربه محققین و متخصصین امر به تفصیل بیان گردیده است. بخش پایانی راهنما به معرفی روشهای مهار حفاظت از آبشستگی در اطراف پایه‌های پل و توصیه‌های فنی اختصاص داده شده است (کمیته فنی شماره ۱۴-۱ (رسوب)، ۱۳۸۱). در ضابطه "طراحی کف بندها و تثبیت کننده‌های بستر"، مجموعه‌هایی از ضوابط و معیارهای طراحی و ساخت کف بندها و تثبیت کننده‌های بستر رودخانه‌ها ارائه شده است. ابتدا انواع کف بندها و تثبیت کننده‌های بستر معرفی شده، سپس ضوابط و معیارهای طراحی و ساخت آن‌ها ارائه گردیده است. در نهایت در زمینه بهره‌برداری و نگه‌داری از آن ها بحث شده است. کف‌بندها، آستانه، سدهای اصلاحی، پوشش‌ها و شیب شکن‌ها جهت تثبیت بستر معرفی و در مورد هر یک از این تثبیت‌کننده‌ها و نوع طبقه‌بندی آن‌ها مطالبی ارائه شده است. در این مجموعه نرم افزارهای موجود برای بررسی پایداری آبراهه و طراحی تثبیت کننده‌های بستر نیز معرفی گردیده است (بنی حبیب و همکاران، ۱۳۹۵). اولین روشی که از دیرباز کاربرد فراوانی در کنترل آبشستگی داشته و مورد استفاده قرار گرفته است، سنگ چین است. در این روش مقاومت مصالح بستر در برابر جریان آب افزایش داده می‌شود. طبق نظریه شیلدز، هرچه قطر مصالح بیشتر باشد، برای جابجایی و به حرکت در آوردن مصالح بستر به سرعت برشی بیشتری نیاز است. اگر بستر با ذرات درشت‌تر جایگزین شود، در این‌صورت احتمال شسته شدن بستر بسیار کم می‌شود. سنگ‌چین می‌تواند از مصالح شکسته و یا رودخانه‌ای تشکیل شود. به‌علت اصطکاک بالا، مصالح شکسته شده مقاومت

بیشتری از خود نشان می‌دهند. برای طراحی سنگ‌چین با توجه به شکل، وزن مخصوص و جنس سنگ‌ها، دو شاخصه مهم اندازه سنگ‌دانه‌ها و محدوده سنگ‌چینی تعیین می‌شود. منظور از محدوده، وسعت قرارگیری سنگ‌چین است. این دو شاخصه با توجه به شرایط هیدرولیکی و سرعت جریان مشخص می‌شوند. چیو (۱۹۹۲) پایداری سنگ‌چین و فرآیندهای مختلف تخریب آن را مورد بررسی قرار داد. استفاده از گابیون (توری‌سنگی) و سنگ‌های مصنوعی (قطعات پیش‌ساخته) نیز مرسوم است. در نشریه گ- ۹۴۲ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، نتایج آزمون‌های مدل‌سازی فیزیکی و عددی برای استفاده در ارزیابی اثرات پیشبندهای سنگچین بر آبشستگی تنگ‌شدگی برای کوله‌های با دیوار عمودی با پِی‌های کم عمق ارایه شده‌اند.

این ارزیابی‌ها مربوط به پیشبندهای نصب شده همسطح با بستر اصلی و همچنین دفن شده در زیر عمق آبشستگی تنگ‌شدگی تخمینی بوده‌اند که در هر دو مورد نصب‌های کامل-عرض و غیر کامل-عرض (جزئی) مَدّ نظر قرار گرفته است. توصیه‌هایی در خصوص محل قرارگیری سنگچین و همچنین ابعاد سنگچین در این نشریه ارایه شده است (محجوب و همکاران، ۱۴۰۰). تفرج نوروزر و همکاران (۲۰۱۰) بررسی جامعی از مطالعات انجام شده بر روی انواع روشهای مختلف تغییر الگوی جریان که به کاهش عمق آبشستگی پایه پل منجر می‌شوند، ارائه دادند. استفاده از طوق یکی از روشهای کنترل آبشستگی از طریق اصلاح الگوی جریان است. طوق، صفحه‌ای با ضخامت کم است که دور پایه را می‌پوشاند و به موازات رودخانه و به طور عمود بر پایه در تراز بستر یا نزدیک آن قرار می‌گیرد. نقش اصلی طوق جلوگیری از برخورد جریان رو به‌پایین به بستر رودخانه است. توماس (۱۹۶۷)، تاناکا و یانو (۱۹۶۷)، نیل (۱۹۷۳)، اتما (۱۹۸۰) و چیو (۱۹۹۲) نشان دادند که با قرار دادن طوق در دور پایه می‌توان، عمق آبشستگی را کاهش داد.

سینگ و همکاران (۲۰۰۱) بررسی‌هایی بر روی طوق جهت کاهش آبشستگی به صورت آزمایشگاهی انجام دادند.

آزمایش‌های گوناگون توسط محققین مختلف نشان داد که کفایت طوق در جلوگیری از آبشستگی تابعی از عرض و ارتفاع آن از سطح بستر است. زراتی و همکاران (۲۰۰۴) اثر طوق بر روی پایه‌های مستطیلی پیشانی گرد را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که هر چه طوق عریض‌تر و پایین‌تر باشد موثرتر بوده و استفاده از طوق موجب افزایش مدت زمان رسیدن به عمق تعادل می‌شود. آنها همچنین دریافتند که هرچه انحراف پایه نسبت به جریان بیشتر باشد، اثر طوق کمتر خواهد بود. زراتی و همکاران (۲۰۰۶) طوق با قطر بیشتر از سه برابر قطر پایه را غیر کاربردی عنوان نمودند. مونکادا و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که با افزایش قطر طوق کارآیی آن در کاهش عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. مسجدی و غلامزاده محمودی (۱۳۹۰) اثر طوقه در کنترل آبشستگی اطراف پایه پل در قوس رودخانه را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. مطالعاتی در خصوص بررسی اثر همزمان طوق و سنگ‌چین نیز انجام شده است. پارسا بصیر (۱۳۸۳) اثر طوق و سنگ‌چین را تواماً بررسی کرد و به این نتیجه رسید که در صورت استفاده از طوق بزرگ با قطری معادل سه برابر قطر پایه، اثر گرداب نعل اسبی و جریان رو به پایین تا زمانی که زیر طوق در پایین دست در اثر گرداب های برخاستی خالی نشود به طور کامل محو می‌شود. او همچنین الگوی پوشش سنگ چین دور پایه را بهبود بخشید. زراتی و همکاران (۲۰۰۶) اثر استفاده از طوق‌های مجزا و ممتد به همراه سنگ‌چین را بر روی کاهش عمق آبشستگی در گروه پایه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در حالت دو پایه در یک خط، ترکیب طوق ممتد و سنگ‌چین منجر به کاهش آبشستگی در حدود ۵۰ و۶۰ درصد برای جلو و پشت پایه می‌شود. ساخت ریزشمع‌ها در جلو پایه از دیگر روش‌های مقابله با آبشستگی است. شمع‌های حفاظتی در بالادست پایه‌های پل نصب شده و باعث جدا شدن جریان نزدیک شونده و در نتیجه کاهش قدرت فرسایش جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی می‌گردند. در حقیقت شمع‌ها در بالادست پایه باعث منحرف شدن جریان با سرعت بالا و ایجاد منطقه کم سرعت دنباله‌رو پشت خود شده و عمق آبشستگی پایه را کاهش می‌دهند. تعداد شمع‌ها، اندازه قطر شمع‌ها نسبت به قطر پایه، ارتفاع شمع‌ها و آرایش هندسی شمع‌ها نسبت به یکدیگر و نسبت به پایه و نیز زاویه قرارگیری شمع‌ها نسبت به پایه از جمله پارامترهای مهم و موثر در کاهش آبشستگی پایه‌های پل در این روش بشمار می‌آیند (Melville and Hadfield, 1999). چابرت و انگلدینجر (۱۹۵۶) اولین محققینی بودند که عملکرد شمع‌های حفاظتی با آرایش مثلثی را مورد بررسی قرار

دادند. نتایج مطالعه آنان کاهش حدود پنجاه درصد آبشستگی را نشان داد. سینگ و همکاران (۱۹۹۵) با انجام آزمایشهایی با شمع‌های محافظ نشان دادند، حداکثر حفاظت برای یک پایه استوانه‌ای به قطر D زمانی حاصل می‌شود، که یک شمع حفاظتی با همان قطر در فاصله دو برابر D بالاتر از پایه نصب گردد. آزم و قمشی (۱۳۹۲) کارآیی و تاثیر شمع‌های حفاظتی بر کاهش آبشستگی موضعی در اطراف پایه استوانه‌ای و تعیین بهترین قطر و موقعیت قرارگیری این شمع‌ها با آرایش خطی (موازی جریان) در بالادست پایه پل را مورد بررسی قرار دادند. تفرج نوروزو و همکاران (۲۰۱۲) عملکرد شش روش مختلف اصلاح الگوی جریان بر روی کنترل و کاهش آبشستگی اطراف پایه پل را به صورت آزمایشگاهی بررسی و مقایسه نمودند. علاوه بر روش‌هایی که به آن اشاره شد، ساخت رادیه و برید، شمع- برید و سد- برید از دیگر اقدامات حفاظتی برای پایه پل‌هایی است که ضعف‌هایی در مطالعه و طراحی آنها وجود داشته است و در سیلابهای گذشته دچار آبشستگی قابل توجّه و وسیعی شده‌اند و پل با خطر شکست مواجه است. سند "طراحیِ اقدامات پیشگیری و تعمیر پل‌ها" با پشتیبانی اداره راه وترابریِ ایالت نیوجرسی تهیه شده و هدف از آن ارائه پیشنهاداتی برای طراحی مناسب اقدامات تعمیر و پیشگیریِ آب‌شستگی در پل‌ها است. این سند در هجده فصل تهیه و انواع روشهای هیدرولیکی و سازه‌ای مقابله با آب‌شستگی در آن ارائه شده است.

یکی از مزایای این مرجع نسبت به مراجع دیگر تفکیک روش‌ها و اقدامات لازم در پایه‌ها و کوله‌ها از یکدیگر و ارائه گزینه مناسب برای هر یک، بطور جداگانه است. ضمناً مزایا و معایب، روابط محاسباتی، نحوه نگهداری، محدودیتها، روش ساخت واجرا و روش برآورد هزینه برای هر گزینه با ارائه مثال بیان شده است(Agrawal et.al., 2005).

سازمان بزرگراه‌های آمریکا در نشریه "راهنمای اقداماتِ پیشگیری و تعمیر خرابیِ ناشی از آب‌شستگی و ناپایداریِ رودخانه در پل‌ها"، بررسی‌های لازم را از لحاظ حساسیت درمقابل آب‌شستگی در مورد تمامی پل‌های ایالات متحده آمریکا را انجام داد. روش‌های کاهش و تاخیر انداختن خرابی ناشی از آب‌شستگی وتعمیر پل‌ها در مدرک HEC23 ارائه و منتشر شد. ویرایش سوم این نشریه مختص پل‌هایی است که بدلیل آب‌شستگی در معرض تخریب قرار گرفته‌اند ولی هنوز بطور کامل تخریب نشده‌اند. بنابر توصیه این راهنما، از جمله مشخصاتی از رودخانه که لازم است برای انتخاب بهترین اقدام تعیین شود، عبارتند از نوع رودخانه، عرض رودخانه، شعاع خم (در صورت وجود)، سرعت جریان، بار آشغال حمل شده توسط رودخانه، شرایط خاکریزهای کناری و عرض دشت‌های سیلابی (FHWA, 2009).

اگر چه تاکنون فعالیت‌های زیادی برای یافتن مکانیسم آبشستگی در اطراف پایه‌ها و ارائه راهکارهایی برای کاهش این پدیده توسط محققین مختلف صورت پذیرفته است لیکن بررسی تحلیلی مزایا، معایب و کاربرد مناسب هر کدام از روشهای مختلف کنترل و کاهش آبشستگی کمتر مورد توجّه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر با دیدگاه کاربردی و اجرایی، استفاده از سنگ چین، بلوک‌های بتنی، گابیون و احداث رادیه و برید که از راهکارهای موجود و رایج برای کاهش عمق آبشستگی در حالت وجودِ پی‌های سطحی و نیمه سطحی (پی‌های فاقد شمع) در پایه پل‌های واقع در رودخانه‌ها می‌باشند، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

۳-سنگچین

استفاده از سنگچین یکی از روش‌های مستقیم تثبیت بستر یا خاکریز کناره رودخانه است. سنگچین به علت وزن مرده خالص سنگ‌ها به صورت یک صفحه، از خاک زیرین که در معرض نیروی فرسایش جریان می‌باشد، حفاظت می‌کنند. (دولتشاهی و همکاران، ۱۳۹۶). سنگچین شکل‌پذیر بوده و بعلت نشست و یا جابجایی سطح زیر آن دچار خرابی کامل نمی‌گردد. خرابی‌های موضعی نیز در آن بسهولت رفع شده و از لحاظ دوام در سطح بالایی قرار دارد (محجوب و همکاران، ۱۳۹٤). مصالح مورد استفاده بعنوان سنگچین باید از جنس مناسب و از نوع سنگ سالم بدون درز و ترک و مقاوم در مقابل فرسایش، هوازدگی، خشک و تر شدن و انجماد و ذوب مکرر باشند. برای حفظ ثبات و پایداری سنگچین و بمنظور جلوگیری از شسته شدن ذرات خاک از لابه‌لای قطعات سنگی درشت، لازم است این لایه روی یک لایه فیلتر متشکل از شن و ماسه با دانه‌بندی مناسب استقرار یابد. طراحی لایه محافظ سنگچین شامل انتخاب قطر، وزن و دانه‌بندی مصالح، ضخامت لایه و نیز طراحی فیلتر زیر لایه است (محجوب و همکاران، ۱۳۹٤).

۳-۱- ملاحظات طراحی سنگچین برای حفاظت پایه‌ها و کوله‌ها

برای تعیین قطر متوسط مصالح سنگچین جهت محافظت از پایه پل‌ها رابطه ۱ پیشنهاد شده است(FHWA, 2009).

$$D_{50} = \frac{0.692(KV)^2}{(2g(S_s - 1))} \quad (۱)$$

D_{50} اندازه متوسط مصالح سنگچین بر حسب متر، V سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه، S_s چگالی مخصوص سنگچین (معمولا برابر با ۲/۶۵) و K برابر یک است. برای لحاظ کردن اثرات شدت آشفتگی، پیشنهاد شده است که مقدار K بیشتر از یک لحاظ گردد. به عنوان مثال در خصوص پایه‌های دایروی، توصیه شده است که سرعت موضعی در بالادست پایه با مقدار K برابر با ۲ درنظر گرفته شود. این تعدیل معادل اینست که مقدار تنش برشی با ضریب ٤ افزایش یافته است. در برخی دیگر از مراجع ضریب K برای پایه‌های دایروی برابر با ۱/۵ و برای پایه‌های مستطیلی برابر با ۱/۷ پیشنهاد شده است. برای تعیین قطر متوسط مصالح سنگچین جهت محافظت از کوله پل‌ها براساس عدد فرود عمل می‌گردد. برای اعداد فرود($\left(\frac{V}{gy}\right)^{0.5}$) کمتر و یا مساوی ۰/۸، معادله طراحی برای تعیین اندازه متوسط مصالح سنگچین برای کوله‌های عمودی و کوله‌های با خاکریز مخروط ناقص به صورت زیر پیشنهاد گردیده است.

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{K}{(S_s - 1)}\left[\frac{V^2}{gy}\right] \quad (۲)$$

D_{50} اندازه متوسط مصالح سنگچین بر حسب متر، V سرعت متوسط ویژه در مقطع تنگ شده برحسب متر بر ثانیه (نحوه محاسبه سرعت متوسط ویژه در مراجع آمده است (FHWA, 2009))، S_s چگالی مخصوص سنگچین (معمولاً برابر با ۲/۶۵)، g شتاب گرانش، y عمق جریان در مقطع تنگ شده و K برابر ۰/۸۹ برای کوله‌های با خاکریز مخروط ناقص و ۱/۰۲ برای کوله‌های عمودی است. برای اعداد فرود بالاتر از ۰/۸ از رابطه ۳ استفاده می‌گردد.

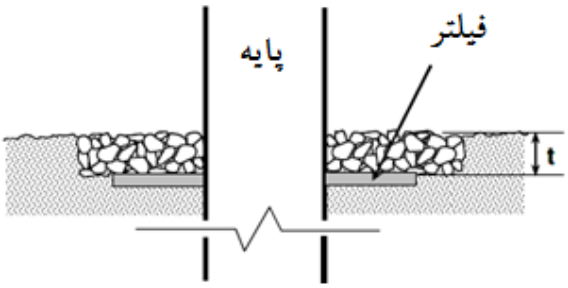
$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{K}{(S_s - 1)}\left[\frac{V^2}{gy}\right]^{0.14} \quad (۳)$$

در رابطه فوق مقدار K برای کوله‌های با خاکریز مخروط ناقص برابر ۰/۶۱ و برای کوله‌های عمودی برابر ۰/۶۹ پیشنهاد شده است (FHWA, 2009). در جدول ۱ دانه‌بندی پیشنهادی، براساس قطر ذره متوسط d_{50}، برای ۱۰ حالت مختلف ارائه گردیده است. به عنوان مثال اگر d_{50} مورد نیاز ۱٦/۸ اینچ محاسبه شده باشد، باید کلاس V مورد نظر قرار گیرد. زیرا در این کلاس قطر اسمی d_{50} برابر با ۱۸ اینچ است.

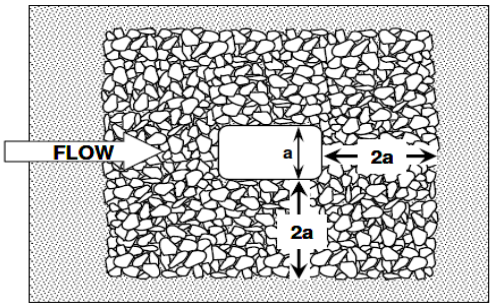
جدول ۱. حداقل و حداکثر اندازه ذره مجاز بر حسب اینچ

کلاس اسمی سنگچین براساس متوسط قطر ذرات		d_{15}		d_{50}		d_{85}		d_{100}
کلاس	اندازه	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداکثر
I	٦	۳/۷	۵/۲	۵/۷	٦/۹	۷/۸	۹/۲	۱۲/۰
II	۹	۵/۵	۷/۸	۸/۵	۱۰/۵	۱۱/۵	۱٤/۰	۱۸/۰
III	۱۲	۷/۳	۱۰/۵	۱۱/۵	۱٤/۰	۱۵/۵	۱۸/۵	۲٤/۰
IV	۱۵	۹/۲	۱۳/۰	۱٤/۵	۱۷/۵	۱۹/۵	۲۳/۰	۳۰/۰
V	۱۸	۱۱/۰	۱۵/۵	۱۷/۰	۲۰/۵	۲۳/۵	۲۷/۵	۳٦/۰
VI	۲۱	۱۳/۰	۱۸/۵	۲۰/۰	۲٤/۰	۲۷/۵	۳۲/۵	۲٤/۰
VII	۲٤	۱٤/۵	۲۱/۰	۲۳/۰	۲۷/۵	۳۱/۰	۳۷/۰	٤۸/۰
VIII	۳۰	۱۸/۵	۲٦/۰	۲۸/۵	۳٤/۵	۳۹/۰	٤٦/۰	٦۰/۰
IX	۳٦	۲۲/۰	۳۱/۵	۳٤/۰	٤۱/۵	٤۷/۰	۵۵/۵	۷۲/۰
X	٤۲	۲۵/۵	۳٦/۵	٤۰/۰	٤۸/۵	۵٤/۵	٦٤/۵	۸٤/۰

از دیگر موارد تعیین ضخامت سنگچین است. حداقل ضخامت سنگچین(t) برای پایه‌ها برابر است با ماکزیمم ۳ برابر d_{50} ، مجموع عمق آبشستگی تنگ‌شدگی و عمومی، ارتفاع ناهمواری‌های بستر (شکل۱). درصورتیکه اجرای سنگچین در زیر آب صورت گیرد، جهت اطمینان باید ضخامت محاسبه شده ۱/۵ برابر گردد. همچنین سطح سنگچین نیز به اندازه دو برابر عرض در مقابل جریان پایه، از لبه پایه ادامه پیدا می‌کند (شکل ۲). عموماً استفاده از فیلتر در زیر لایه سنگچین مورد نیاز است که الزامات آن در مراجع ارائه شده است (FHWA, 2009).



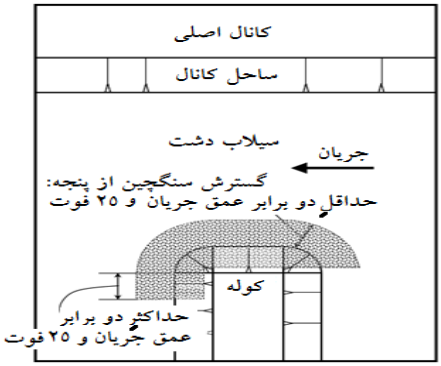
شکل ۱. ضخامت سنگچین اطراف پایه



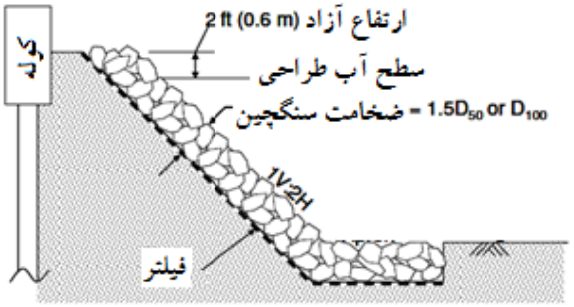
شکل ۲. هندسه سنگچین اطراف پایه (FHWA, 2009)

درخصوص کوله‌ها نیز همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، پیشبند سنگچین باید به اندازه مینیمم دو برابر عمق آب در سیلاب‌دشت در نزدیکی خاکریز و ۷/۵ متر به سمت داخل آبراهه امتداد یابد. همچنین پیشبند سنگچین باید به اندازه ماکزیمم دو برابر عمق آب در سیلاب‌دشت در نزدیکی خاکریز و ۷/۵ متر به سمت مخالف آبراهه امتداد یابد.

شیب‌های خاکریز کوله مخروطی باید با سنگچینی که براساس معادلات ۲ و ۳ محاسبه شده است، محافظت گردد و تا تراز ۶۰ سانتی‌متر بالاتر از بالاترین تراز آب برای دبی سیلاب طراحی، ادامه یابد. ضخامت سنگچین نباید کمتر از ماکزیمم d_{100} و ۱/۵ برابر d_{50} باشد. درمواردیکه عملیات زیرآبی انجام شود، ضخامت سنگچین ۱/۵ برابر می‌گردد. همانطور که در شکل ٤ نشان داده شده است، سطح بالای پیشبند باید با سطح سیلاب‌دشت همتراز باشد. این توصیه از آن جهت است که سنگچین نباید سبب مسدود شدن عبور جریان از آبراهه دهانه پل گردد (FHWA, 2009). استفاده از فیلتر مانند آنچه در مورد پایه‌ها بیان شد نیز باید مدنظر قرار گیرد.



شکل ۳. پلان امتداد پیشبند سنگچین اطراف کوله



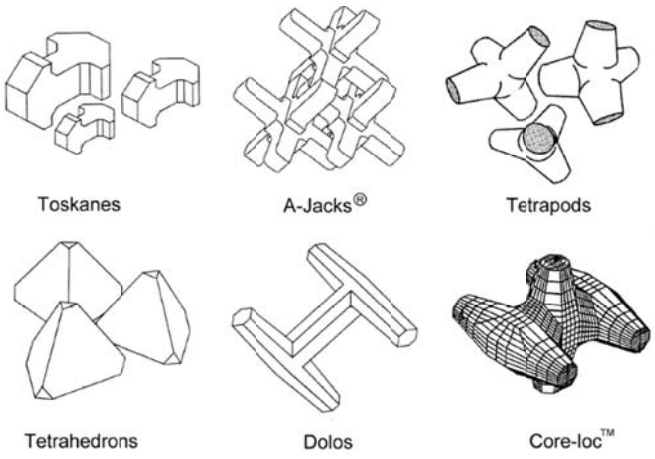
شکل ٤. سطح مقطع سنگچین در اطراف کوله

طی تحقیقی در اداره بزرگراه‌های آمریکا انجام شده است توصیه شده است که حتی المقدور از سنگچین در تراز بستر استفاده نشود و سنگچین به صورت دفنی به اندازهٔ ارتفاع تخمینی آبشستگی تنگ‌شدگی پایین‌تر از سطح بستر قرار گیرد. همچنین برای حالاتی که نسبت عرض دهانه پل به عمق آب در محل پل قبل از آبشستگی، کم‌تر یا مساوی ٦/٢ باشد، سنگچین دفنی کامل- عرض ارجحیت دارند. این محدودیت‌ها از آن جهت مورد تاکید قرار گرفته است که نصب سنگچین غیرکامل عرض نه تنها در سطح مشترک سنگچین با بستر، آشفتگی ایجاد می‌کنند (به علت زبری متفاوت بستر و سنگچین)، بلکه مانع افزایش ظرفیت گذردهی نیز می‌شوند. در نتیجهٔ این دو اثر است که آبشستگی مشاهده شده از آنچه که برای آبشستگی تنگ‌شدگی پیش‌بینی شده بود، بیش‌تر خواهد بود(FHWA, 2017).

٤-بلوک‌های بتنی

بلوک‌های بتنی به عنوان سنگچین مصنوعی شناخته می‌شوند و برای مناطقی که تهیه سنگ‌های سنگچین دشوار است مورد استفاده قرار می‌گیرد. این واحدها نسبت به سنگچین‌ها دارای مقاومت بیشتری می‌باشد که این مقاومت بیشتر باعث می‌شود تا در شیب‌های تندتر و یا با وزن کمتری نسبت به سنگچین‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در شکل ٥ نمونه‌هایی از واحدهای بتن مسلح نشان داده شده است(FHWA, 2009).

از رایج‌ترین بلوک‌های بتنی می‌توان توسکان‌ها را نام برد، نمونه‌ای از توسکان‌ها در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل ٥. نمونه‌های مختلف واحدهای بتن مسلح (FHWA, 2009)

شکل ٦. نمونه توسکان‌های قرار گرفته در کنار یکدیگر برای محافظت از پایه پل (FHWA, 2009)

٤-١- ملاحظات طراحی توسکان برای حفاظت پایه‌ها و کوله‌ها

مراحل طراحی توسکان‌ها به شرح زیر پیشنهاد شده است (FHWA, 2009):

١- تعیین سرعت طراحی

سرعت طراحی با توجه به رابطه ذیل بدست می‌آید.

$$V_u = 1.5 \times V_\circ \times C_l \times C_s \times C_h \times C_i \quad (٤)$$

ضریب اطمینان ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود.

V_u: سرعت طراحی جریان (متر بر ثانیه)، V_0: سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه) در بالادست رودخانه و نزدیک پل (تقریباً ۳ متر بالادست پل). اگر آبشستگی تنگ‌شدگی قابل توجه باشد، مقدار سرعت را بر همین اساس باید افزایش داد. C_l: ضریب تعدیل موقعیت پایه یا کوله در سطح مقطع (۰/۹ برای مواقعی که پایه یا کوله نزدیک ساحل رودخانه مستقیم باشد، ۱ برای اغلب موارد (شرایط عادی: پایه یا کوله در یک رودخانه مستقیم و بدور از سواحل قرار دارند)، ۱/۱ برای پایه یا کوله‌هایی که در معرض جریان اصلی در یک خم تیز قرار گرفته است، ۱/۲ برای پایه یا کوله‌هایی که در معرض جریان اصلی در یک خم بسیار تند قرارگرفته است).

نکته قابل ذکر اینست که HEC-18 مقدار C_l را ۱/۷ پیشنهاد داده است. C_s: ضریب تعدیل شکل پایه یا کوله است. در صورتیکه زاویه برخورد جریان به پایه یا کوله بزرگتر از ۵ درجه است، مقدار C_s یک در نظر گرفته می‌شود و برای زاویه‌های کمتر از ۵ درجه، C_s به صورت ذیل می‌باشد:

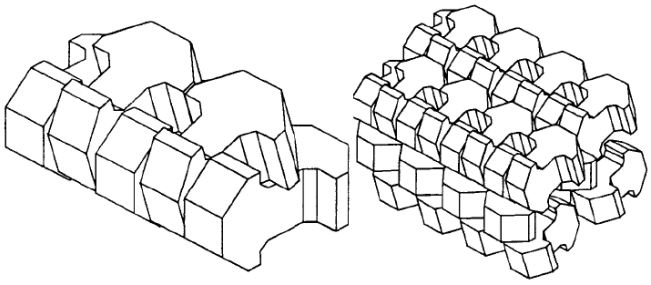
۱ برای پایه‌های دایره‌ای، ۱/۱ برای پایه‌های با دماغه چهارگوش، ۰/۹ برای پایه‌های با دماغه تیز، ۱/۱ برای کوله با دیوار عمودی، ۰/۸۵ برای کوله با دیوار عمودی و دیوارهای جناحی (دیوار بالی شکل)، ۰/٦۵ برای کوله باز (کوله همراه با خاکریز مخروطی)

C_h: فاکتور مربوط به سطح فوقانی لایه توسکان است. C_h برابر است با ۱ زمانیکه سطح لایه توسکان هم‌تراز با کف بستر کانال می‌باشد و برابر است با ۱/۱ زمانیکه سطح لایه توسکان به اندازه دو لایه توسکان از بستر کف کانال بالاتر می‌باشد. نکته قابل ذکر اینست که نباید ارتفاع لایه توسکان بیش از ۲۰ درصد عمق آب ورودی به محل پل باشد. همچنین از تلنبار کردن (به صورت تپه درآوردن) توسکان‌ها هم جدا پرهیز گردد زیرا اثرات مخرب جانبی زیادی دارد.

C_i: فاکتور مربوط به نحوه اجرای لایه توسکان است. نصب به صورت تصادفی و یا منظم انجام می‌پذیرد. در نصب تصادفی واحدهای بتن مسلح به صورت تصادفی بر روی بستر کانال ریخته می‌شوند. در نصب منظم واحدهای بتن مسلح به طور منظم و یکنواخت و با دقت در اطراف پایه یا کوله قرار می‌گیرند.

مقادیر C_i برای حالات مختلف به شرح زیر است:

۱ برای نصب به صورت تصادفی (شکل ٦)، ۰/۹ برای نصب به صورت منظم ۱ تا ۲ لایه واحدهای بتن مسلح همراه با فیلتر (شکل ۷- الف)، ۰/۸ برای نصب به صورت منظم ۲ تا ٤ لایه واحدهای بتن مسلح (شکل ۷-ب)



(ب) (الف)

شکل ۷. الگوی نصب الف) به صورت منظم ۱ تا ۲ لایه توسکان ب) به صورت منظم ۲ تا ٤ لایه توسکان (Fotherby and Ruff, 1995)

شایان ذکر است که نرم افزارهای عددی زیادی قابلیت تخمین سرعت طراحی در اطراف پایه و یا کوله پل را دارند که می‌توان از آن‌ها استفاده نمود.

۲- تعیین عرض معادل پایه و یا کوله (b_a) که در مقابل جریان قرار می‌گیرد.

برای پایه:

b_a= عرض پایه (b)، اگر زاویه برخورد جریان با پایه کمتر از ۵ درجه باشد. $b_a = L\sin\alpha + b\cos\alpha$، اگر زاویه برخورد با پایه (α) بیشتر از ۵ درجه باشد، (L طول پایه است). اگر ارتفاعی از پی پایه که در داخل میدان جریان قرار گرفته است به اندازه بیشتر از y_0 ۰/۱ (y_0 عمق جریان ورودی به

(۵)

که در آن S_g، چگالی توسکان‌ها است. شکل (۸)، ابعاد و پارامترهای طراحی توسکان‌ها را نشان می‌دهد.

محل پل) باشد، عرض پی را به جای عرض پایه (b) در رابطه فوق استفاده می‌گردد.

برای کوله: با توجه به مقدار b (عرض کوله)، طول معادل عمود بر جریان برای کوله به شرح زیر است:

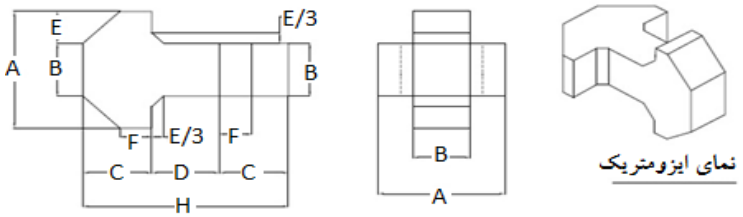
اگر $b < ۱/۵$ (m) آنگاه $b_a = ۱/۵$ (m)، اگر $۱/۵ < b < ٦$ (m) آنگاه $b_a = b$ (m)، اگر $b > ٦$ (m) آنگاه $b_a = ٦$ (m)

۳- تعیین اندازه توسکان

قطر معادل کره (D_u)، قطر کره‌ایست که حجم آن با حجم واحد بتن مسلح توسکان یکسان است و مقدار آن از رابطه ذیل بدست می‌آید.

$$D_u = \frac{0.255 V_u \sqrt{\frac{b_a}{g}}}{S_g - 1}$$

$D_u = 0.622 \times H$ و H طول توسکان است. بقیه ابعاد توسکان مطابق جدول ۲ تعیین می‌گردند.



شکل ۸ ابعاد و پارامترهای طراحی توسکان‌ها

جدول ۲. ابعاد قسمت‌های مختلف توسکان براساس موارد مشخص شده در شکل ۸- (FHWA, 2009)

D_u	A	B	C	D	E	F
0.622H	0.616H	0.280H	0.335H	0.330H	0.168H	0.156H

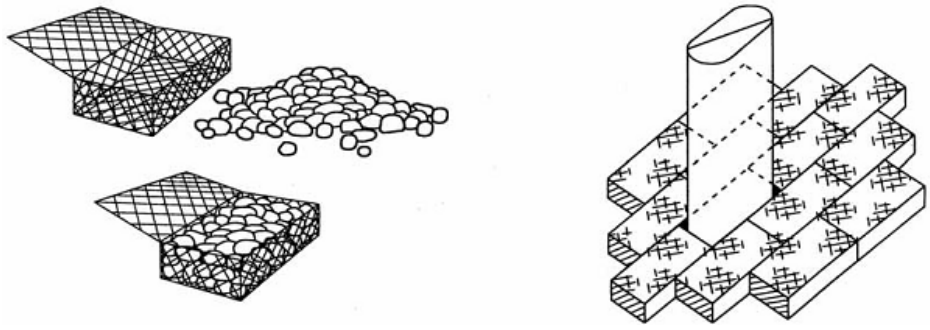
از دیگر مواردی که باید کنترل شود، اینست که نسبت $\frac{b_a}{D_u}$ کمتر از ۲۱ باشد. اگر این شرط برقرار نبود، مقدار D_u مورد استفاده را زیاد کنید.

٤- شعاع محدوده‌ای که باید از توسکان پوشیده شود.

شعاع محدوده‌ای که باید از توسکان پوشیده شود، برای پایه‌ها $۱/۵\,b_a$، و برای کوله‌ها $۲\,b_a$ پیشنهاد شده است. بدین صورت که اجرای توسکان از لبه پایه یا کوله شروع شده و تا فاصله تعیین شده از لبه پایه و یا کوله، توسکان اجرا می‌گردد. در شرایطی که زاویه برخورد جریان به پل نامشخص باشد، در اثر فرسایش تدریجی بستر کانال، امکان نمایان شدن پی وجود داشته باشد، سرعت طراحی در نزدیکی پل نامشخص باشد، مساحت حفره آبشستگی به طور معناداری بیشتر از مساحت تعیین شده برای اجرای توسکان باشد، این مقدار افزایش می‌یابد. ممکن است در یک سطح مقطع، در نقاط مختلفی از توسکان‌ها برای محافظت پایه‌ها و کوله‌ها استفاده شود. اگر محدوده بدون توسکان بین این مناطق از ۱/۵ متر کمتر باشد، باید در این مناطق هم از توسکان استفاده شود. به عبارت دیگر یک محدوده یکپارچه برای حفاظت دو سازه مجاور ایجاد گردد. اگر مواد بستر ماسه، شن یا قلوه‌سنگ‌های کوچک باشد، یک لایه فیلتر دانه‌ای باید در قسمت زیرین توسکان‌ها قرار بگیرد. برای کسب اطلاعات بیشتر دراین خصوص می‌توانید به HEC-23 مراجعه کنید(FHWA, 2009).

٤-۲-گابیون

گابیون‌ها، صندوق یا سبدهایی ساخته شده از شبکه‌های فلزی مشبک می‌باشند که توسط قلوه سنگ و یا شن‌های درشت دانه پر شده‌اند. در شکل (۹) نحوه قرارگیری یک نوع سازه گابیون در اطراف پایه پل ارائه شده است. گابیون‌ها در انواع مختلفی ساخته و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند که از جمله آنها می‌توان به گابیون کیسه‌ای، گابیون جعبه‌ای، گابیون به صورت بالشتک رنو و سنگچین قرار گرفته در شبکه سیمی اشاره کرد.



شکل ۹. قرارگیری گابیون در پایه پل

استفاده از گابیون دارای مزایای زیادی نسبت به سایر روش‌های مقابله با آب‌شستگی می‌باشد. این مزایا عبارتند از:

۱- ساختار متخلخل آنها سبب کاهش تاثیر نیروی بالابرنده می‌گردد.

۲- قابلیت انعطاف پذیری شبکه مشبک فلزی، این امکان را به گابیون‌ها می‌دهد تا مطابق با فرم بستر تغییر شکل داده و به حالت پایدار در آید. همچنین گابیون‌ها می‌توانند به آسانی انباشته شده و به شکل پایدار درآیند.

۳- به خاطر ضخامت کوچکتر گابیون، مقدار کمتری سنگ مورد نیاز است. (نسبت به سایر روشها نظیر سنگچین)

٤- گابیون‌ها به خصوص بر روی شیب‌های تند ساحل رودخانه و در مکان‌هایی که سنگچین‌ها پایدار نمی‌باشند، کاربرد وسیعتری دارند.

٤-۳- طراحی گابیون

اندازه گابیون باید در بهترین شرایط برای مولفه‌های عمق جریان و سرعت جریان ثابت باشد. مقدار ضریب مانینگ برای گابیون، ۰/۰۲۵پیشنهاد شده است. با توجه به آنکه سنگ‌ها در گابیون درون شبکه مشبک فلزی قرار می‌گیرند، نسبت به سنگچین می‌تواند از سنگ‌های کوچکتری استفاده نمود. به طور معمول ضخامت گابیون بین ۱/۳ تا ۲/۳ ضخامت سنگچین متغیر است. ابعاد گابیون‌ها بر اساس اطلاعات شرکت سازنده مشخص می‌شود و ضخامت آن با توجه به سرعت بحرانی جریان از جدول (۳) بدست می‌آید. در اینجا سرعت بحرانی، سرعتی است که باعث تغییر شکل قابل قبول در شکل بالشتک (گابیون‌ها) می‌گردد.

جدول (۳) یک حد بالا و پایین برای سرعت بحرانی، ابعاد سنگ‌ها و ضخامت گابیون ارائه می‌دهد. برای ضریب اطمینان بیشتر، ضخامت و ابعاد سنگ‌ها باید براساس حد پایین سرعت بحرانی تعیین شود.

به عنوان مثال، برای سرعت بحرانی (ft/s) ١٤ ضخامت گابیون یک فوت و ابعاد سنگ‌ها ۳/۹ اینچ بر مبنای سرعت بحرانی (ft/s) ۱۳/۸ انتخاب می‌شود. در استفاده از جدول (۳) برای محاسبه ابعاد سنگ‌ها باید نکات ذیل رعایت شود:

-حداقل ابعاد سنگ >۱/۲۵ برابر ماکزیمم فضای بین شبکه مشبک سیمی

-حداکثر ابعاد سنگ < ۲/۳ برابر ارتفاع جعبه یا صندوق

-حداقل ارتفاع جعبه یا صندوق > ٦ اینچ

جدول ۳. اندازه گابیون‌ها براساس سرعت طراحی

Gabion Thickness (ft)	Stone Size (inch)	Critical Velocity (ft/sec)	Limiting Velocity (ft/sec)
0.49-0.56	3.3	≤11.5	13.8
	4.3	13.8	14.8
0.75-0.82	3.3	11.8	18.0
	4.7	14.8	20.0
1.0	3.9	13.8	18.0
	4.9	16.4	21.0
1.64	5.9	19.0	24.9
	7.5	21.0	26.2

همچنین ابعاد سنگ ها برای گابیون را می‌توان با کمک رابطه پیلازیک محاسبه نمود.

$$D_{n50} = \frac{\mu}{(1-\rho)(s-1)} \frac{0.035}{\phi_{cr}} \frac{k_T k_Y}{k_s} \frac{u^2}{2g} \quad (٦)$$

که در آن:

ϕ_{cr}: فاکتور پایداری (برای گابیون ۰/۰۷)

ρ: ضریب تخلخل سنگ‌های پر شده در گابیون که حداکثر ۰/٤ می‌باشد.

μ: فاکتور تصحیح پایداری (۰/۷۵ برای حفاظت مداوم و ۱/۵ تا ۱ برای حفاظت غیرمداوم)

s: چگالی نسبی سنگ

k_T: فاکتور آشفتگی (۱ برای آشفتگی معمولی و ۱/۵ تا ۲ برای آشفتگی بالا در پایه پل‌ها)

k_Y: فاکتور عمق که برابر است با $\left[\frac{d_{n50}}{y_0}\right]^{0.2}$ (y_0: عمق موضعی آب)

k_s: فاکتور شیب ($k_s = k_d k_1$)

$$k_d = Cos\,\varepsilon \sqrt{1-\left(\frac{\tan\varepsilon}{\tan\phi}\right)^2}$$

ε: زاویه ساحل رودخانه با افق

ϕ: زاویه اصطکاک داخلی پوشش

$$k_1 = Sin(\phi - x)/Sin\varphi$$

x: زاویه کف رودخانه با افق

اندازه سنگ در معادله (٦) با توجه به فرایند تکراری گامهای ذیل محاسبه می‌شود.

گام اول: انتخاب ابعاد سنگ‌ها براساس جدول (۳) و محاسبه فاکتور عمق (k_Y) براساس رابطه $\left[\frac{d_{n50}}{y_0}\right]^{0.2}$

گام دوم: محاسبه d_{n50} با استفاده از k_Y محاسبه شده و معادله (٦) و بازگشت به گام اول و محاسبه مجدد k_Y

گام سوم: تکرار گام‌های یک و دو تا زمانیکه اختلاف مقدار d_{n50} بین تکرارها قابل صرفنظر است.

مقدار انتخابی نهایی برای ابعاد سنگ‌های گابیون باید از مقدار بدست آمده از جدول (۳) و معادله (٦) بیشتر باشد.

برای پایه‌های پل در بستر ماسه‌ای زمانیکه ($D_{50} \prec 0.2(mm)$)، حداقل حجم سبد گابیون می‌تواند براساس معادله ذیل بدست آید.

$$V = \frac{0.069u^6K^6}{\rho_r^3(\rho-1)^3g^3} \quad (۷)$$

که در آن :

V: حجم مجاز سبدهای غیر متصل و منفرد

u: سرعت جریان در نزدیکی پل

K: ۱/۵ برای پایه های با دماغه گرد و ۱/۷ برای پایه با دماغه چهار گوش

ρ_r: چگالی سبد یا صندوق

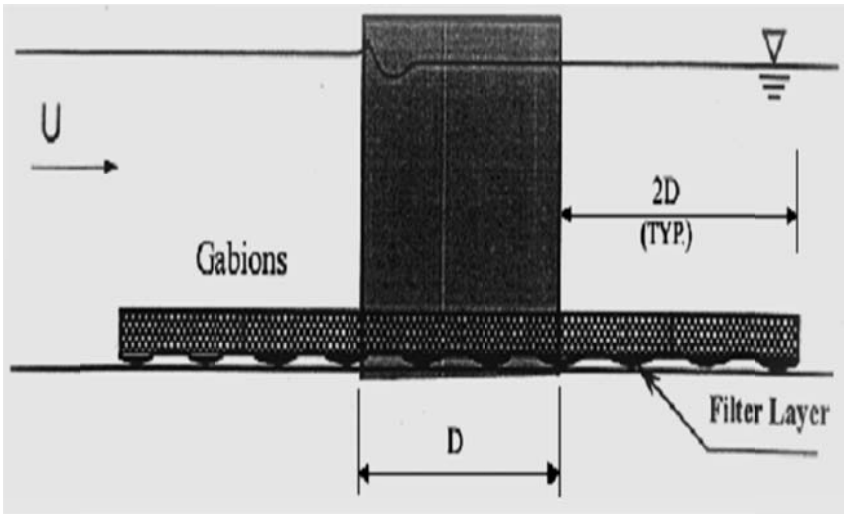
ρ : چگالی آب

g: شتاب ثقل (۳۲/۲ فوت بر مجذور ثانیه)

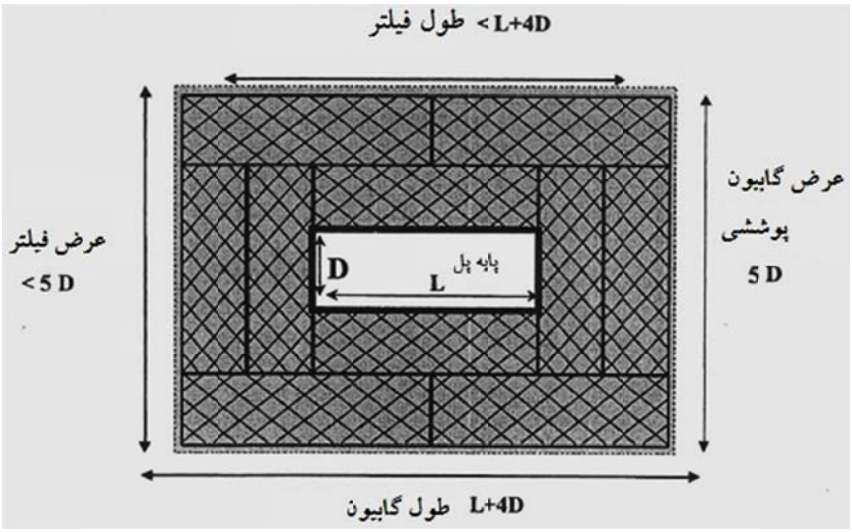
انتخاب نهایی حجم سبد گابیون باید بزرگتر از مقدار محاسبه شده از رابطه (۷) باشد. در انتخاب اندازه کوچکترین سنگ قرار گرفته در شبکه مشبک سیمی، اندازه آن نباید از ۳ اینچ کمتر و از ۱۲ اینچ بزرگتر باشد. هر چند ابعاد واقعی بر مبنای توصیه شرکت سازنده گابیون باید باشد.

٤-٤- طرح اولیه گابیون در پایه و کوله پل‌ها

مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، مساحت گابیون در پایه پل به صورت 2D از هر سمت پایه پیشنهاد شده است. که در آن، D عرض پایه می‌باشد، البته مقدار مساحت فیلتر مورد استفاده در زیر گابیون می‌تواند از این مقدار نیز کمتر باشد.



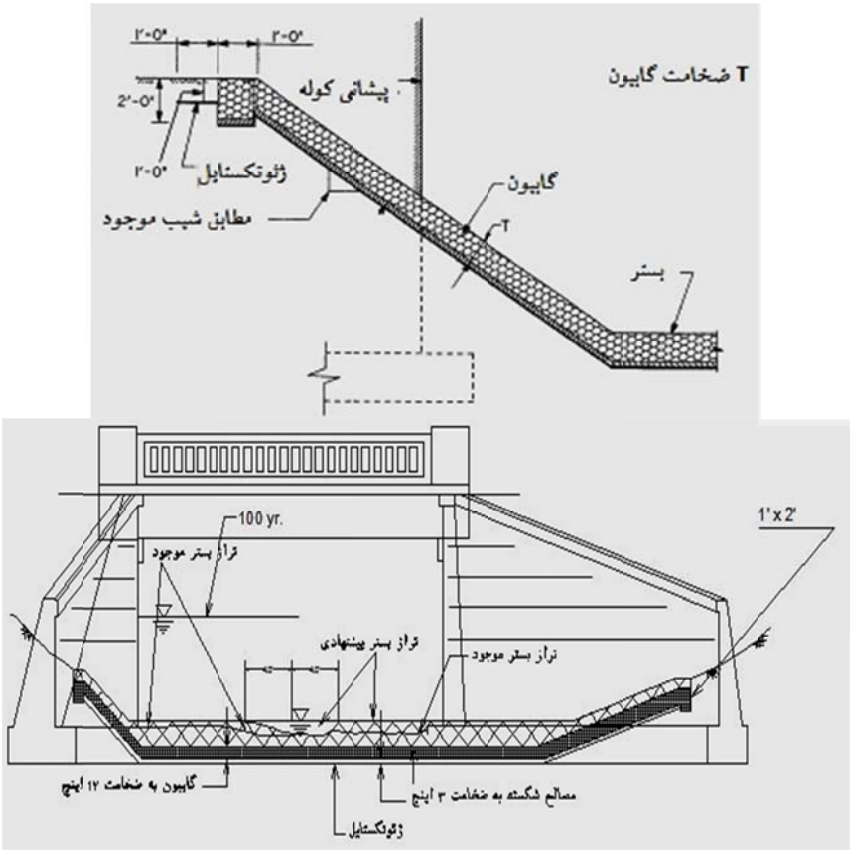
شکل ۱۰. گابیون نصب شده در پایه پل



شکل ۱۱. مساحت گابیون و فیلتر ژئوتکستایل در پایه پل

برای کوله بسته با دیواری عمودی، مساحت گابیون به صورت 2D از هر سمت کوله پیشنهاد شده است (که D عرض کوله است).

در شکل‌های (۱۲) طرح اولیه گابیون دارای خاکریز و کوله باز ارئه شده است. برای بازشدگی‌های کم (پل با دهانه کوچک)، شبکه گابیون‌ها باید سرتاسر بین دو کوله امتداد یابد.



شکل ۱۲. جزئیات گابیون در خاکریز

۵-رادیه و برید

ساخت رادیه و برید یک اقدام حفاظتی برای پایه پلهایی است که بنا به دلایل مختلف از جمله ضعف‌هایی در مطالعه و طراحی آنها، برداشت بی رویه مصالح از رودخانه، عدم هدایت صحیح جریان به محل پل، توزیع غیریکنواخت جریان بین دهانه‌ها و ... دچار آبشستگی شدید شده‌اند. بدلایل مشکلات فنی و زیست محیطی، به هیچ عنوان در مطالعه و طراحی پلهای جدید (که هنوز احداث نشده‌اند) پیش بینی احداث رادیه و برید توصیه نمی‌گردد. رادیه، بستری بتنی با ضخامت محدود است که کل مقطع عرضی پل را می‌پوشاند. هدف از احداث برید جلوگیری از آبشستگی پایه‌ها و کوله‌های پل است. برید دیواره‌هایی می‌باشند که در بالادست و پایین دست رادیه با هدف جلوگیری از نفوذ و نشت آب به زیر رادیه و پی و همچنین نگهداری رادیه است. در شکل‌های ۱۳ و ۱٤ تصاویر از کاربرد رادیه و برید برای محافظت پل‌ها در برابر آبشستگی ارائه شده است.

شکل ۱۳. کنترل آبشستگی با احداث رادیه و برید، پل تجن ساری

شکل ۱٤. حفاظت پایه های پل با استفاده از رادیه و برید

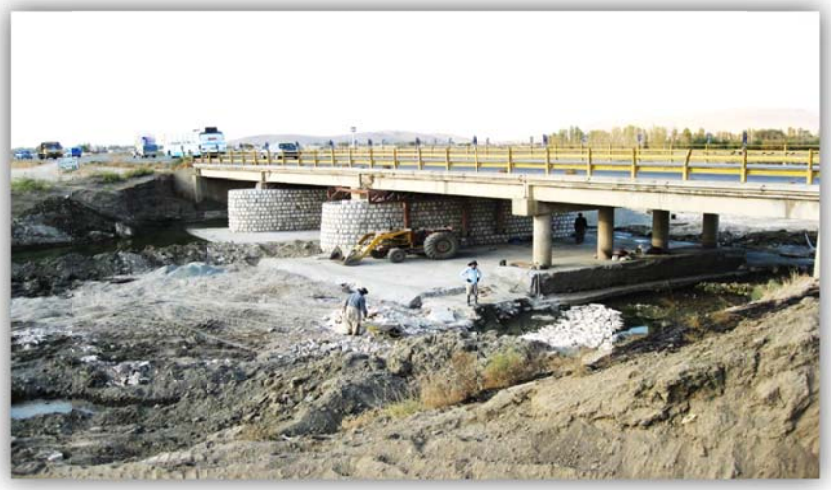
به منظور احداث رادیه و برید انجام مطالعات و تهیه نقشه‌های اجرایی با توجه به شرایط هیدرولیکی رودخانه در محل پل، نوع رسوبات، سیلاب‌های روی داده در منطقه، عمق و گستردگی آبشستگی و سایر ملاحظات فنی و اجرایی ضروری است.

در حالت کلی برای طراحی و ساخت رادیه و برید نکات گفته شده در ادامه می‌بایست مد نظر قرار گیرد.

-تعیین عامل اصلی آبشستگی پایه‌ها و در صورت امکان کاهش اثرات آن عامل با اقدامات اصلاحی
-تنظیم بستر و پاکسازی ورودی و خروجی به محل پل به منظور بهبود شرایط هیدرولیکی
-ترمیم آبشستگی‌های موجود و همتراز نمودن بستر با پی پل
-اجرای رادیه و برید

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمونه‌هایی از مراحل اجرای رادیه و برید ارائه شده است.

شکل ۱۵. آرماتور بندی و احداث رادیه



شکل ۱۶. حفاظت پایه‌های پل با استفاده از رادیه و برید

۶-نتیجه‌گیری

علت اصلی هیدرولیکی تخریب پل‌های رودخانه‌ای آبشستگی است. با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان سبب بهبود عملکرد پل‌های مذکور در مقابل آبشستگی کمک کرد. در این مقاله نکات استفاده از سنگچین، بلوک‌های بتنی، گابیون و رادیه برید مورد بررسی قرار گرفتند. دلیل انتخاب این روش‌ها، فراوانی استفاده و بازدهی نسبی بالای آن‌ها بوده است. البته اشراف علمی مهندس هیدرولیک پل بر روش‌های فوق الاشاره و نگاه جامع فنی، مدیریتی و حتی اقتصادی به موضوع لازم و ضروری است. اما نکته بسیار مهم این است که هر کدام از این روش‌ها محدودیت‌ها، مزایا و معایب خود را دارد. سنگچین و بلوک‌های بتنی انعطاف پذیر بوده و خودش را با تغییرات جدید و نشست خاک وفق می‌دهد. در گابیون نیز قابلیت انعطاف پذیری شبکه مشبک فلزی، این امکان را می‌دهد تا مطابق با فرم بستر تغییر شکل داده و به حالت پایدار در آید.

درحالیکه رادیه برید بدلیل صلبیت بالا قابلیت انطباق با شرایط جدید بستر رودخانه را ندارد.

هزینه کم اجرا و نگهداری سنگچین نسبت به سایر روش‌ها از مزیت‌های مهم این روش است. استفاده از بلوک‌های بتنی و گابیون به لحاظ اقتصادی هزینه‌بر بوده اما رادیه برید نسبت به بقیه روش‌ها هزینه بسیار بالاتری دارد. مصالح مناسب جهت استفاده بعنوان سنگچین در اکثر رودخانه‌ها قابل استحصال است اما تهیه مقدمات لازم برای اجرای سایر روش‌ها نسبت به سنگچین مشکل است.

با توجه به استفاده زیاد از رادیه برید در کشور ما، کارفرمایان، مشاورین و پیمانکاران آشنایی کاملی با موضوع دارند و با نصب رادیه در اطراف پایه و یا کوله پل، از برخورد مستقیم جریان رو به پایین به بستر تا حد بسیار زیادی جلوگیری می‌شود.

بلوک‌های بتنی به عنوان سنگچین مصنوعی شناخته می‌شوند و برای مناطقی که تهیه سنگ‌های سنگچین دشوار است مورد استفاده قرار می‌گیرد. این واحدها نسبت به سنگچین‌ها دارای مقاومت بیشتری می‌باشد که این مقاومت بیشتر باعث می‌شود تا در شیب‌های تندتر و یا با وزن کمتری نسبت به سنگچین‌ها مورد استفاده قرار گیرند. گابیون نیز مقاومت بیشتری نسبت به سنگچین دارد و به خاطر ضخامت کوچکتر گابیون، مقدار کمتری سنگ نسبت به سنگچین مورد نیاز است.

در شرایط پیچیده هیدرولیکی مانند خم رودخانه‌ها و یا جریان‌های با سرعت بالا (سرعت‌های بالاتر از ۳ متر برثانیه)، استفاده از سنگچین به تنهایی کافی نخواهد بود اما امکان استفاده از بلوک‌های بتنی در چنین شرایطی وجود دارد. گابیون‌ها نیز به خصوص بر روی شیب‌های تند ساحل رودخانه و در مکان‌هایی که سنگچین‌ها پایدار نمی‌باشند، کاربرد وسیعتری دارند. رادیه برید نیز باعث به تاخیر افتادن زمان شروع آب‌شستگی و در خیلی از مواقع باعث کاهش قابل ملاحظه عمق آبشستگی موضعی در اطراف پایه و کوله می‌شود.

پتانسیل تخریب پنجه پوشش سنگچین و بلوک‌های بتنی از زیر و ایجاد گودال آب‌شستگی وجود دارد. همچنین در مواردی‌که فاصله بین مناطق محافظت شده با سنگچین کم باشد، زبری ناهمگون مصالح طبیعی بستر و مصالح سنگچین سبب افزایش تنش برشی در بستر محافظت نشده می‌گردد که نهایتا سبب افزایش عمق آبشستگی در بستر محافظت نشده می‌گردد. این موضوع درخصوص گابیون و رادیه برید هم وجود دارد اما شدت و ضعف آن نیاز به بررسی موردی دارد.

شوری آب در پوسیدگی و از بین رفتن بلوک‌های بتنی بسیار مهم می‌باشند. بنابراین برای دریاها و رودخانه‌های با شوری بالا استفاده از بلوک‌های بتنی توصیه نمی‌شود. در گابیون‌ها نیز شکست شبکه مشبک فلزی و بیرون آمدن سنگها از داخل آن به خاطر خوردگی (که می‌تواند ناشی از استفاده از سیم‌های نامرغوب صورت گیرد) محتمل است.

سنگچین کمترین معضلات زیست محیطی را نسبت به گابیون و بلوک‌های بتنی دارد. در حالیکه از مهمترین معضلات رادیه برید، بروز مشکلات متعدد زیست محیطی خصوصا در مواردیکه به علت آبشستگی شدید، بتن رادیه و برید دچار شکستگی شده باشد، است. با عنایت به مطالب ذکر شده در خصوص مزایا و معایب هر کدام از روشهای مقابله با آبشستگی، اگر چه اقدامات حفاظتی برای هر پل با توجه به شرایط هیدرولیکی جریان، وضعیت بستر رودخانه، عمر سازه، مقدار آبشستگی و سایر عوامل نیازمند مطالعه خاص است، لیکن به ترتیب اولویت استفاده از سنگ چین، گابیون، بلوک بتنی و رادیه و برید پیشنهاد می‌گردد.

۷-مراجع

-آزم، نوال و قمشی، مهدی (۱۳۹۲). اثر شمع‌های حفاظتی بر کاهش آبشستگی در پایه پل استوانه‌ای. *نشریه دانش آب و خاک*، ۲۳(۳)، ۱۳٤-۱۲۳.

-بنی حبیب، محمد ابراهیم، عربی، آذر، قاسمی، لیلا و کنشلو، امیر (۱۳۹۵). ضوابط طراحی کف بندها و تثبیت کننده‌های بستر. *ضابطه شماره ۷۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.*

-پارسا بصیر، حمید (۱۳۸۳). حفاظت پایه‌های پل در مقابل آب‌شستگی موضعی با استفاده توام از سنگ‌چین و طوق. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.*

-دولتشاهی پیروز، محرم و کریمی، عباس (۱۳۹٦). راهنمای پیشگیری و تعمیر خرابی‌های ناشی از آبشستگی در پل‌ها. *انتشارات پژوهشکده حمل و نقل، چاپ اول.*

-غلامی، مهران و همکاران (۱۳۹۸). مجموعه گزارش‌های تخصصی سیلاب‌های فروردین ۹۸، بررسی آسیب‌های راه و ابنیه فنی، گزارش کار گروه حمل و نقل و ابنیه فنی. *مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی*، چاپ اول.

-کمیته فنی شماره ۱٤-۱ (رسوب). (۱۳۸۱). راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل"، *نشریه شماره ۲٦۰ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.*

-محجوب، امیر و گواشیری، زهرا (۱۳۹٤). راهنمای مطالعات هیدرولیکی پل‌ها. ضابطه شماره ۳۸۷، *سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.*

-محجوب، امیر، سلیمانی کرمانی، محمدرضا و منصورزاده، سیدمحمد (۱٤۰۰). مطالعه عددی عملکرد سنگچین جهت محافظت از کوله‌های عمودی پل‌های تک دهانه. نشریه گ-۹٤۲. *مرکزتحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.*

-مسجدی، علیرضا و غلامزاده محمودی، مهدی (۱۳۹۰). بررسی آزمایشگاهی اثر طوقه در کنترل آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک.* سال پانزدهم. شماره پنجاه و پنجم.

-Agrawal, A., K., Khan, M.A. and Yi, Z. (2005). Handbook of Scour Countermeasures Designs. City College of the City University of New York, Region 2 Transportation Research Center, *NJDOT Research Project Manager: Nazhat Aboobaker.*

-Beg, M. and Beg, S. (2013). Scour Reduction around Bridge Piers: A Review. *International Journal of Engineering Inventions*, 2(7) .07-15

-Chabert, J. and Engeldinger, P. (1956). Etude des affouillement autour des Piles des ponts (Study on Scour around bridge piers) . *Laboratoire National d'Hydraulique*, Chatou, France.

-Chiew, Y.M. (1992). Scour Protection at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, *ASCE*, 118(9), 1260-1269.

-Ettema, R. (1980). Scour at Bridge Piers. Report No. 216, *School of Engineering., University of Auckland*, Auckland, New Zeeland.

-FHWA, (2009). Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience. *Selection, and Design Guidance-Third Edition,* Publication No. FHWA-NHI-09-112. Hydraulic Engineering Circular No. 23. Two Volumes.

-FHWA, (2017). Hydraulic Performance of Shallow Foundations for the Support of Vertical-Wall Bridge Abutments. *Publication No. FHWA-HRT-17-013.*

-Fotherby, L.M. and J.F. Ruff, (1995). Bridge Scour Protection System Using Toskanes Phase 1. *Pennsylvania Department of Transportation, Report 91-02.*

-Hamill, L. (2004). Bridge Hydraulics. T*aylor & Francis e-Library.*

-Melville, B.W. and Hadfield, A.C. (1999). Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering,* ASCE, 125(11), 1221-1224.

-Moncada-M A.T., Aguirre-Pe J., Bol ´ var J.C. and Flores E.J. (2009). Scour protection of circular bridge piers with collars and slots. *Journal Hydraulic Research*, *ASCE,* 47(1), 119-126.

-Neill, C.R. (1973). Guide to bridge hydraulics. Edited by C.R. Neill, *published for Roads and Transportation Assn.* of Canada by University of Toronto Press.

-Singh C.P., Setia B. and Verma D.V.S. (2001). Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier. *Proc. 29th IAHR Congress*, Beijing, Theme D. 202r. Pr.

-Singh KK, Verma DVS and Tiwari NK, (1995). Scour protection at circular bridge piers. *6th International Symposium on River Sedimentation*. New Delhi, India.

-Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., and Calomino, F. (2012). Evaluation of Flow-Altering Countermeasures against Bridge Pier Scour. *Journal of Hydraulic Engineering,* 138(3), 297–305.

-Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., and Dey, S. (2010). Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: a review. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 441-452.

-Tanaka, S. and Yano, M., (1967). Local Scour around a Circular Cylinder. Proc. *12th IAHR Congress,* delft, The Netherlands, 3, 193-201.

-Thomas, Z. (1967). An Interesting hydraulic effect occurring at local scour", *Proc. 12th Congress,* I.A.H.R., Ft. Collins, Colorado, 3(1), 125-134.

-Wardhana, K., and Hadipriono, F. C. (2003). Analysis of Recent Bridge Failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities,* 17(3), 151-158.

-Zarrati, A.M., Gholami, H. and Mashahir, M.B. (2004). Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Research,* IAHR. 42(1), 97-103.

-Zarrati, A.M., Nazariah, M. and Mashahir, M.B. (2006). Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier group using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering,* ASCE, 132(2), 154-162.

Evaluation and Comparison of Methods of Bridge Piers and Abutments Protection against Local Scour

Amir Mahjoob, Assistant Professor, Transportation Research Institute, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Fouad Kilanehei, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

E-mail: kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

One of the most important reasons for the instability and failure of river bridges is the scouring around its piers and abutments during floods. In the recent years, the issue of local scouring has been widely studied by various researchers and different methods have been proposed to control scouring, such as the use of riprap, gabion, collars, concrete blocks, sacrificial piles, groove and cables. In this article, firstly, various methods of protection against scouring have been introduced and previous studies have been reviewed. In the following, from a practical and executive point of view, the use of riprap, concrete blocks, gabion and the construction of apron and cut off wall, which are among the existing and common methods to reduce bridge scouring in the presence of shallow foundations (foundations without piles) are reviewed and compared. All the mentioned methods are classified in the category of bed-armoring. The design and executive considerations are presented in each case and the advantages and disadvantages of each method are stated. Finally, according to the different conditions of the river and the bridge structure, the most appropriate method has been proposed in terms of execution, economy and maintenance.

Keywords: Bed Reinforcement, River Bridges, Stabilization, Scour, Shallow Foundation