

طراحی قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه

مهوش منصوری هفشجانی

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری

محمود شفاعی بجنستان

استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

ایمیل نویسنده مسئول: mansoori.m.8@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۰/۱/۸

تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۲۹

چکیده

فرسایش در قوس رودخانه به دلیل وجود جریان ثانویه نسبت به مسیر مستقیم تشدید می‌گردد، لذا توجه به موضوع فرسایش و کنترل و کاهش آن در این بخش از رودخانه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر ارائه رابطه برای تخمین قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه‌هاست. در این تحقیق ابتدا معادله بی‌بعد بر مبنای آنالیز ابعادی برای آستانه حرکت و آستانه شکست استخراج شد و سپس آزمایش‌ها با استفاده از سه نوع سنگ‌چین با چگالی‌های ۱/۵۱، ۲/۰۵، ۲/۶۵ و با قطرهای ۴/۷۵، ۹/۵۲، ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی‌متر انجام شد. هر سنگ‌چین با استفاده از چهار دبی ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۳ و ۰/۰۲۸ مترمکعب بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. هر آزمایش از عمق جریان بالا شروع شد و به تدریج عمق کاهش داده می‌شد تا زمانی که اولین حرکت در سنگ‌دانه‌ها مشاهده شود و در این لحظه مشخصات جریان به عنوان مشخصات آستانه حرکت اندازه‌گیری می‌گردید. شرایطی از جریان که در آن سنگ‌دانه‌ها به صورت گروهی شروع به حرکت می‌کردند آستانه شکست تعریف گردید و مشخصات جریان در این لحظه به عنوان مشخصات آستانه شکست اندازه‌گیری می‌شد. با استفاده از داده‌های به دست آمده، فرمول‌های طراحی قطر سنگ‌چین برای کنترل آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه ارائه گردید. همچنین فرمول‌های ارائه شده توسط تحقیق حاضر با روابط ارائه شده از مطالعات پیشین بر روی سنگ‌چین اطراف تکیه‌گاه واقع در مسیر مستقیم مقایسه شد و ضریب تصحیح مناسب برای استفاده از این روابط در قوس ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌چین، تکیه‌گاه پل، قوس رودخانه، آب‌شستگی، جریان ثانویه.

مقدمه

سمت پایین دست حمل می‌شوند که این عمل باعث توسعه حفره آب‌شستگی در محل استقرار تکیه‌گاه خواهد شد (غزل و همکاران ۱۳۸۸). بر اساس مطالعات سازمان بزرگراه‌های ایالات متحده در سال ۱۹۷۳، از تعداد ۳۸۳ مورد خرابی در پل‌ها، ۲۵٪ مربوط به خرابی پایه‌ها و ۷۲٪ مربوط به خرابی تکیه‌گاه‌ها بوده است. طبق بررسی‌های کانداسمی و ملویل در سال ۱۹۹۸، ۶ تا ۱۰ مورد تخریب پل در نیوزلند، ناشی از آب-شستگی در تکیه‌گاه آنها بوده است (صانعی ۱۳۸۵). قوس رودخانه به خاطر داشتن الگوی خاص جریان به نام جریان حلزونی، همواره مورد توجه مهندسين هیدرولیک

به فرسایش بستر و کناری آبراهه در اثر عبور جریان آب، به فرسایش بستر در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و یا به فرسایش بستر در اثر به وجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی، آب‌شستگی گویند (شفاعی بجنستان ۱۳۸۷). پس از احداث پل به دلیل قرارگرفتن پایه‌های و تکیه‌گاه پل در مسیر جریان رودخانه تغییراتی در الگوی جریان در این محدوده به وجود می‌آید که منجر به تشکیل و توسعه جریان‌های گردابی می‌شود. این گرداب‌ها مواد اطراف تکیه‌گاه را از جای خود کنده و این مواد توسط جریان اصلی رودخانه به

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{0.67}{(G_s - 1)} Fr^2 \quad (1)$$

پاگان- ارتیز (۱۹۹۱) روابط ۲ و ۳ را برای تکیه‌گاه با دیواره عمودی و تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای ارائه داد: رابطه (۲): تکیه‌گاه با دیواره عمودی

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{1.05}{(G_s - 1)^{0.81}} Fr^{1.62}$$

رابطه (۳): تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{0.535}{(G_s - 1)} Fr^2$$

سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا^۱ (۱۹۹۴) به نقل از ملویل و کولمن (۲۰۰۰)، به منظور طراحی قطر مناسب سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل رابطه ۴ را ارائه نمود:

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{1.026}{(G_s - 1)} Fr^2$$

ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵)، براساس محدوده عدد فرود و با در نظر گرفتن فاکتوری به نام فاکتور شکل (K_s) که بر مبنای نوع تکیه‌گاه قابل تعریف است (۰/۸۹) برای تکیه-گاه با دیواره نوک دایره‌ای و ۱/۰۲ برای تکیه‌گاه با دیواره عمودی) رابطه ۵ را ارائه نمودند:

(۵)

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{K_s}{(G_s - 1)} Fr^2 \quad Fr \leq 0.8$$

در تمامی معادلات شماره ۱ تا ۵، پارامتر D_{50} : اندازه متوسط سنگ‌چین، y : عمق جریان، Fr : عدد فرود و G_s : چگالی مخصوص سنگ‌چین می‌باشد.

از تحقیقات انجام شده در ایران به منظور حفاظت پل در مقابل آب‌شستگی با استفاده از سنگ‌چین، می‌توان به تحقیق کیخانی و همکاران (۱۳۸۸) در رابطه با بررسی الگوی سنگ‌چین در محل احداث گروه پایه‌های پل‌ها

بوده است. با ورود جریان به قوس، نیروی گریز از مرکز به آن اثر می‌کند که این نیرو در راستای شعاع قوس و نیز در جهت عمق به خاطر تغییرات سرعت، متغیر می‌باشد. نیروی گریز از مرکز موجود در قوس باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌شود که سطح آب را در قوس بیرونی بالا برده و در قوس داخلی باعث کاهش عمق می‌شود. این پدیده باعث ایجاد گرادیان فشار جانبی در داخل مقطع خواهد شد. هرگاه گرادیان فشار مزبور بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند، جریانی در جهت عرضی، داخل مقطع شکل می‌گیرد که به جریان ثانویه موسوم است. در اثر این جریان، ذرات موجود در سطح آب به طرف دیواره بیرونی حرکت کرده و ذرات موجود در کف به طرف دیواره داخلی جابه جا می‌شوند (غلامزاده محمودی و شفافی بجزستان ۱۳۸۸). چیرای (۱۹۶۷) نشان داد که قدرت جریان ثانویه در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد قدرت جریان طولی است. وی همچنین نشان داد که در اثر اندرکنش جریان ثانویه با پروفیل غیریکنواخت سرعت طولی و شکل گرفتن جریان حلزونی، تغییرات زیادی در الگوی جریان در قوس نسبت به مسیر مستقیم ایجاد می‌گردد (رضانیا و همکاران ۱۳۸۸). در نتیجه وقتی شرایط خم در محلی ایجاد گردید، تغییر الگوی جریان در محل پل و بخصوص تکیه‌گاه واقع در ساحل خارجی قوس و همچنین وجود جریان حلزونی در قوس ممکن است باعث گردد تا تنش برشی موضعی در بستر در محل تکیه‌گاه نسبت به بازه مستقیم رودخانه متفاوت باشد. عمده مطالعات انجام شده در خم رودخانه‌ها، بیشتر بر شناسایی مکانیسم آب‌شستگی تأکید شده است که از جمله می‌توان به بین (۱۹۷۰)، انگلوند (۱۹۷۴)، کیکاوا و همکاران (۱۹۷۶)، ادگارد (۱۹۸۲) و قدسیان و موسوی (۲۰۰۶) اشاره کرد و مطالعات اندکی در مورد حفاظت سازه‌های واقع در قوس رودخانه‌ها انجام شده است.

از جمله روش‌های ساده و در بسیاری مواقع اقتصادی برای حفاظت تکیه‌گاه پل در مقابل آب‌شستگی، استفاده از پوشش سنگ‌چین می‌باشد. از جمله دانشمندانی که به طراحی قطر سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل واقع در مسیر مستقیم پرداختند، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: سایمون و لویس (۱۹۷۱)، رابطه ۱ را به منظور طراحی قطر سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل ارائه نمودند:

^۱. Austroads

در رابطه ۶، V : سرعت جریان در پایین دست قوس، y_t : عمق آب در پایین دست قوس، g : شتاب ثقل، ρ_w : جرم حجمی آب، D_{50} : قطر متوسط سنگ چین و ρ_s : جرم مخصوص ذرات سنگ چین می باشد. بر اساس روش π باکینگهام، ۳ گروه بدون بعد $\pi_1 = \frac{gy_t}{V^2}$ ، $\pi_2 = \frac{D_{50}}{y_t}$ و $\pi_3 = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ استخراج می گردد که عدد بی بعد π_1 به عدد فرود (Fr) اشاره دارد. بنابراین رابطه گروه های بدون بعد، به صورت معادله ۷ ارائه می گردد:

$$(\pi_1)f_2(G_s, \frac{D_{50}}{y_t}, Fr) = 0$$

در رابطه ۷ G_s : چگالی سنگ چین، D_{50} : قطر متوسط سنگ چین، y_t : عمق پایاب و Fr : عدد فرود می باشد.

مواد و روش ها

الف) فلوم: آزمایش ها در آزمایشگاه مدل دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، در فلومی با قوس ۹۰ درجه، عرض ۰/۴ متر، ارتفاع ۰/۷ متر، شیب کف صفر و شعاع انحنای متوسط ۰/۸ متر انجام پذیرفت. با توجه به این که انحنای نسبی ($R/B=2$) قوس ۲ می باشد این قوس در رده قوس های تند قرار می گیرد. فلوم شامل مخزن آرام کننده ورودی می باشد. طول مسیر مستقیم ورودی (از انتهای مخزن تا ابتدای قوس) برابر ۴ متر و مسیر مستقیم خروجی (از انتهای قوس تا انتهای فلوم) برابر ۲ متر می باشد، در انتهای فلوم از دریچه کشویی برای تنظیم سطح آب و از یک حوضچه جهت جمع آوری رسوبات فرسایش یافته و از یک سرزیر مثلثی لبه تیز با زاویه ۹۰ درجه برای اندازه گیری دبی استفاده شده است. شکل ۱ نشان دهنده پلان فلوم آزمایشگاهی می باشد.

اشاره کرد، نتایج تحقیق کیخائی و همکاران نشان داد که مساحت محدوده پوشش سنگ چین در گروه پایه ها برای هر پایه نسبت به تک پایه کاهش یافته است که یکی از امتیازات کاربرد سنگ چین برای حفاظت گروه پایه ها است. نتایج تحقیق زراتی و همکاران (۲۰۰۶) در محل گروه پایه های پل با استفاده از ترکیب سنگ چین و طوق، نشان داد که در دوپایه های در یک خط موازی با جهت جریان، استفاده از ترکیب سنگ چین و طوق پیوسته باعث کاهش آب شستگی در جلو و پشت پایه ها به ترتیب به میزان ۵۰ و ۶۰ درصد شده است.

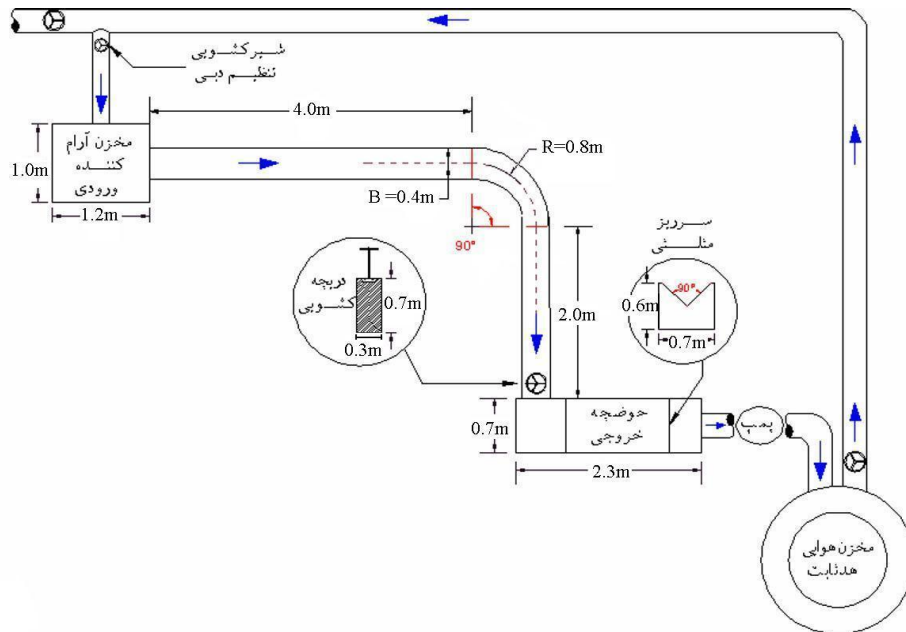
همچنین نتایج تحقیقات قربانی و همکاران (۱۳۸۴) به منظور کنترل و کاهش آب شستگی موضعی با استفاده از چهار اندازه سنگ چین و دو اندازه شکاف پایه نشان داد که وجود شکاف باعث مقاوم تر شدن و افزایش پایداری سنگ چین می گردد و این افزایش پایداری در شکاف بزرگ تر مشهودتر است.

در این تحقیق ابتدا معادله بی بعد بر مبنای آنالیز ابعادی برای آستانه حرکت و آستانه شکست استخراج شد و سپس آزمایش ها با استفاده از سه نوع سنگ چین با چگالی های ۱/۵۱، ۲/۰۵، ۲/۶۵ و با قطرهای ۴/۷۵، ۹/۵۲، ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی متر انجام شد. هر سنگ چین با استفاده از چهار دبی ۰/۱۷، ۰/۲۰، ۰/۲۳ و ۰/۲۸ مترمکعب بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت.

آنالیز ابعادی

با صرف نظر کردن از پارامترهای ثابت در این تحقیق از جمله: شعاع انحنای متوسط قوس (۰/۸ متر)، انحنای نسبی قوس ($R/B=2$)، عرض فلوم (۰/۴ متر)، موقعیت تکیه گاه در طول قوس (قرارگیری در زاویه ۷۵ درجه از ابتدای قوس) و نوع تکیه گاه، عوامل مؤثر بر پایداری سنگ چین را می توان با تابع زیر بیان کرد:

$$f_1(V, y_t, g, \rho_w, D_{50}, \rho_s) = 0 \quad (6)$$



شکل ۱- پلان فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

ج) تکیه‌گاه و سنگ‌چین: با انجام آزمایش‌های مقدماتی مشخص گردید که بیشترین میزان آب‌شستگی در طول قوس، در زاویه ۷۵ درجه رخ داده است، بنابراین تکیه‌گاه در موقعیت ۷۵ درجه قوس خارجی قرار داده شد و با انجام آزمون و خطا مقدار درصد انسداد ۱۰٪ برای تکیه‌گاه انتخاب گردید. نوع تکیه‌گاه به کار رفته، تکیه‌گاه با دیواره بالدار ۴۵ درجه (45° Wing-Wall Abutment) با ارتفاع ۰/۶۸ متر و از جنس پلکسی‌گلاس می‌باشد. همچنین سنگ‌چین‌های به کار رفته در این تحقیق، ۳ نوع ماده با چگالی‌های مختلف بوده که همه آنها تیز گوشه و با دانه‌بندی یکنواخت می‌باشند. مشخصات این سنگ‌چین‌ها در جدول ۱ ارائه گردیده است.

ب) رسوبات: به توصیه رادکیوی و اتما (۱۹۸۳)، برای جلوگیری از تشکیل ریپل، قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلیمتر بزرگ‌تر باشد. همچنین بیشتر تحقیقات در مبحث آستانه حرکت با مصالح یکنواخت صورت گرفته است که از جمله آنها دیاگرام شیلدز می‌باشد که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی روی مصالح یکنواخت صورت گرفته است که برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوبات بر آب‌شستگی، انحراف معیار هندسی ذرات باید کمتر از ۱/۳ باشد (شفاعی بجستان ۱۹۹۱). برای برآورده شدن شرایط ذکر شده، رسوبات انتخاب شده برای آزمایش‌ها دارای اندازه متوسط ۱/۶۳ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی $\sigma_g = 1.28$ می‌باشند. ضخامت مصالح بستر نیز ۰/۳۶ متر انتخاب گردید.

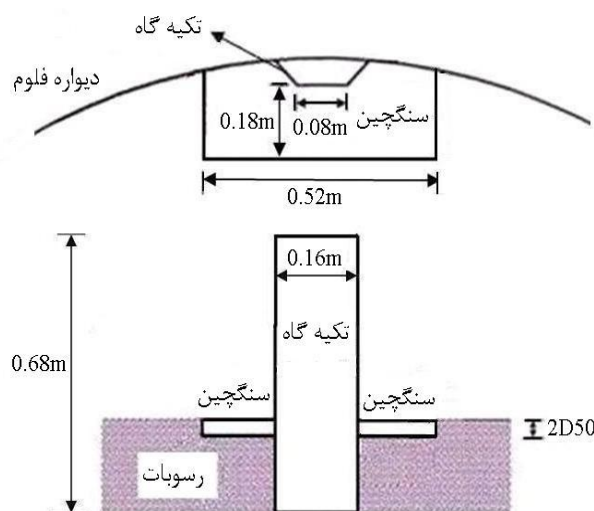
جدول ۱- مشخصات سنگ‌چین‌های به کار رفته در اطراف تکیه‌گاه

چگالی سنگ‌چین	اندازه متوسط سنگ‌چین (mm)
۲/۶۵	۱۹/۰۵ و ۱۲/۷، ۹/۵۲، ۴/۷۵
۲/۰۵	۱۲/۷ و ۹/۵۲
۱/۵۱	۱۹/۰۵ و ۱۲/۷

ابعاد گودال آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه انجام شد. در طی این آزمایش ۱۲ ساعته، عمق آب‌شستگی دماغه تکیه‌گاه و ساحل خارجی در فواصل زمانی معین به وسیله عمق‌سنج

برای تعیین وسعت سنگ‌چین (که برای تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است)، آزمایش بدون قرارگیری سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه به منظور بررسی حداکثر

شکل محدوده سنگ چین بر اساس مطالعات ملویل و همکاران (۲۰۰۷) به شکل مستطیلی و تراز آن، هم‌تراز با مصالح بستر در نظر گرفته شد. ضخامت لایه سنگ چین نیز با توجه به معیار ارائه شده توسط ملویل و همکاران (۲۰۰۷)، دو برابر قطر متوسط سنگ چین طراحی شد. ابعاد تکیه‌گاه و سنگ چین به کار رفته در اطراف آن در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- ابعاد تکیه‌گاه و سنگ چین به کار رفته در اطراف آن

پایین دست منتقل شود "آستانه حرکت" تعریف گردید و در این لحظه عمق جریان در مسیر مستقیم پایین دست قوس به عنوان عمق آستانه حرکت اندازه‌گیری می‌شد و سپس دریاچه را به آرامی باز کرده و مجدداً سطح سنگ-چین به صورت چشمی بررسی می‌شد تا زمانی که آستانه شکست رخ دهد که شرایطی از جریان که ذرات سنگ-چین به صورت گروهی شروع به حرکت می‌کردند "آستانه شکست" تعریف گردید و در این لحظه عمق جریان در مسیر مستقیم پایین دست قوس به عنوان عمق آستانه شکست اندازه‌گیری می‌شد. در انتهای هر آزمایش، جریان ورودی قطع و فلوم زهکشی می‌شد. سپس ذرات سنگ چین جدا و بستر فلوم با مصالح مسطح و ذرات سنگ چین روی آن قرار می‌گرفتند و آزمایش با دبی دیگری انجام می‌گرفت. پس از تکمیل این آزمایش‌ها، اندازه و یا نوع مصالح تغییر و همان شرایط با ذره سنگی جدیدی تکرار می‌شد. شکل ۳ نشان‌دهنده آستانه شکست سنگ چین در پایان نمونه‌ای از آزمایشات می‌باشد.

اندازه‌گیری شد. پس از انجام آزمایش، مشخص گردید که حدود ۸۵ درصد آب‌شستگی در دو ساعت اول آزمایش به وقوع می‌پیوندد. بنابراین زمان آزمایش تعیین وسعت سنگ چین، دو ساعت در نظر گرفته شد و به ازای دبی حداکثر (۰/۰۲۸ مترمکعب بر ثانیه) و عمق جریان ۱۶ سانتی‌متر انجام شد. پس از انجام این آزمایش، وسعت سنگ چین برای انجام آزمایش‌ها مشخص گردید. همچنین

نحوه انجام آزمایشات: قبل از انجام هر گونه آزمایش ابتدا باید رسوبات درون فلوم آزمایشگاهی تسطیح گردد. سپس سنگ چین موردنظر به ضخامت $2D_{50}$ و هم‌تراز با مصالح بستر در اطراف تکیه‌گاه قرار داده شده و جهت جلوگیری از فرسایش و به وجود آمدن آب‌شستگی‌های ناخواسته مربوط به جریان اولیه، در شروع آزمایش دریاچه انتهایی کانال را بسته و با دبی بسیار کم کانال پر می‌شود. پس از تنظیم دبی مورد نظر، عمق جریان توسط دریاچه پایین دست در پریودهای زمانی پانزده دقیقه به آهستگی کاهش داده شده و پس از هر بار کاهش عمق، شرایط جریان برای مدتی ثابت نگه داشته می‌شد تا تاثیر کاهش عمق به بالادست فلوم نیز برسد و عمق آب در طول فلوم و در نقاط مختلف ثابت باشد. پس از اطمینان از ثابت بودن عمق آب در طول فلوم، نحوه حرکت مصالح سنگ چین به صورت چشمی بررسی می‌گردید. هر نوع حرکت ذرات سنگ چین اعم از لرزش، جابجائی کم و یا حرکت ممتد به سمت پایین دست ثبت می‌گردید. شرایط جریان را که در آن شرایط ذره سنگ چین از محل خود کنده شود و به



شکل ۳- آستانه شکست سنگ‌چین در نمونه‌ای از آزمایشات

نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها، به ازای هر عمق پایاب اندازه‌گیری شده، سرعت متوسط و عدد فرود جریان، در حالت آستانه حرکت و آستانه شکست محاسبه شد. مشاهدات نشان داد که به ازای هر اندازه قطر سنگ‌چین ثابت، با افزایش دبی، عمق پایاب لازم جهت آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگ‌چین افزایش می‌یابد. به ازای دبی ثابت Q ، با کاهش عمق پایاب، اندازه قطر سنگ‌چین (D_{50}) که در آستانه حرکت و آستانه شکست قرار گرفته است نیز افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه اعماق پایاب جهت آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگ‌چین با چگالی‌های مختلف نشان می‌دهد که هرچه چگالی ذرات

سنگ‌چین بیشتر باشد، آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگ‌چین در عمق پایاب پایین‌تری رخ می‌دهد. همچنین مشاهده سطح ذرات سنگ‌چین در حین انجام آزمایش‌ها نشان داد که ناپایداری سنگ‌دانه‌های اطراف تکیه‌گاه در تمامی آزمایشات ابتدا از دماغه پایین‌دست تکیه‌گاه آغاز شده و با کاهش عمق جریان به سمت بالادست دماغه کشیده می‌شود. مقادیر عدد فرود، سرعت متوسط جریان و عمق پایاب مربوط به آستانه حرکت و آستانه شکست به ازای کلیه دبی‌های آزمایشی و قطرها و چگالی‌های مورد استفاده برای ذرات سنگ‌چین در جدول ۲ ارائه شده است.

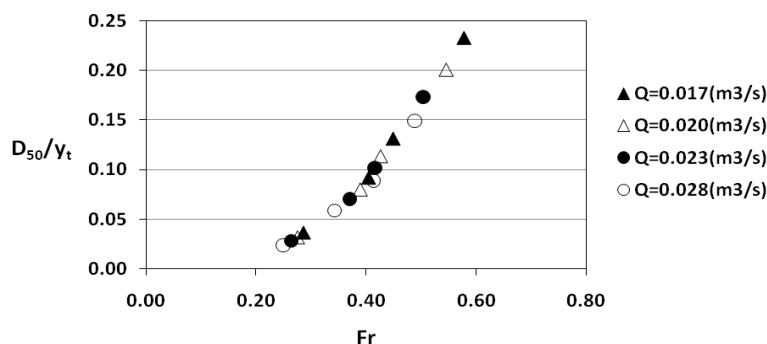
جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایشات آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگ‌چین

G_s	Q (m^3/s)	D_{50} (mm)	y_{tc} (m)	V_c (m/s)	Fr_c	y_{tf} (m)	V_f (m/s)	Fr_f
۲/۶۵	۰/۰۱۷	۴/۷۵	۰/۱۳۱	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۱۰	۰/۴۳	۰/۴۳
۲/۶۵	۰/۰۱۷	۹/۵۲	۰/۱۰۴	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۰۷۱	۰/۶۰	۰/۷۲
۲/۶۵	۰/۰۱۷	۱۲/۷	۰/۰۹۷	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۰۶۸	۰/۶۳	۰/۷۷
۲/۶۵	۰/۰۱۷	۱۹/۰۵	۰/۰۸۲	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۰۵۸	۰/۷۳	۰/۹۷
۲/۶۵	۰/۰۲۰	۴/۷۵	۰/۱۵	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۱۱۸	۰/۴۲	۰/۳۹
۲/۶۵	۰/۰۲۰	۹/۵۲	۰/۱۱۹	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۰۹	۰/۵۶	۰/۵۹
۲/۶۵	۰/۰۲۰	۱۲/۷	۰/۱۱۲	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۰۸	۰/۶۳	۰/۷۱
۲/۶۵	۰/۰۲۰	۱۹/۰۵	۰/۰۹۵	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۰۶۴	۰/۷۸	۰/۹۸
۲/۶۵	۰/۰۲۳	۴/۷۵	۰/۱۶۹	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۱۲۵	۰/۴۶	۰/۴۲
۲/۶۵	۰/۰۲۳	۹/۵۲	۰/۱۳۵	۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۰۹۹	۰/۵۸	۰/۵۹
۲/۶۵	۰/۰۲۳	۱۲/۷	۰/۱۲۵	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۰۸۸	۰/۶۵	۰/۷۰
۲/۶۵	۰/۰۲۳	۱۹/۰۵	۰/۱۱	۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۰۷۵	۰/۷۷	۰/۹۰
۲/۶۵	۰/۰۲۸	۴/۷۵	۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۱۵۵	۰/۴۵	۰/۳۷
۲/۶۵	۰/۰۲۸	۹/۵۲	۰/۱۶۲	۰/۴۳	۰/۳۴	۰/۱۲	۰/۵۸	۰/۵۴

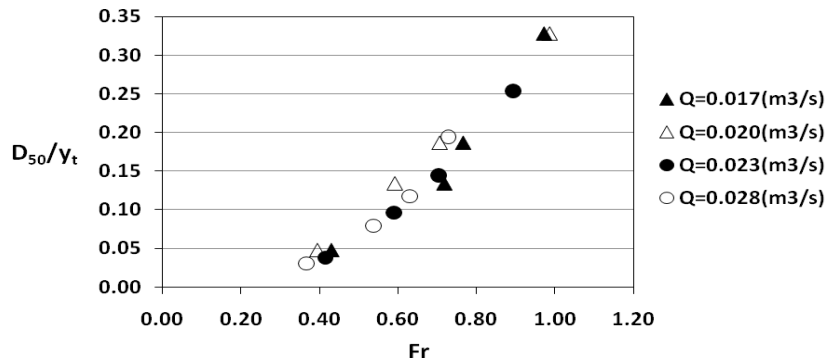
۲/۶۵	۰/۰۲۸	۱۲/۷	۰/۱۴۳	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۱۰۸	۰/۶۵	۰/۶۳
۲/۶۵	۰/۰۲۸	۱۹/۰۵	۰/۱۲۸	۰/۵۵	۰/۴۹	۰/۰۹۸	۰/۷۱	۰/۷۲
۲/۰۵	۰/۰۱۷	۹/۵۲	۰/۱۳۲	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۱۰	۰/۴۳	۰/۴۳
۲/۰۵	۰/۰۱۷	۱۲/۷	۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۰۸۵	۰/۵۰	۰/۵۵
۲/۰۵	۰/۰۲۰	۹/۵۲	۰/۱۴۵	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۴۵	۰/۴۳
۲/۰۵	۰/۰۲۰	۱۲/۷	۰/۱۲۸	۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۰۹۸	۰/۵۱	۰/۵۲
۲/۰۵	۰/۰۲۳	۹/۵۲	۰/۱۶۳	۰/۳۵	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۴۸	۰/۴۴
۲/۰۵	۰/۰۲۳	۱۲/۷	۰/۱۵۸	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۱۱۲	۰/۵۱	۰/۴۹
۲/۰۵	۰/۰۲۸	۹/۵۲	۰/۱۹۵	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۴۷	۰/۳۸
۲/۰۵	۰/۰۲۸	۱۲/۷	۰/۱۷۵	۰/۴۰	۰/۳۱	۰/۱۳۲	۰/۵۳	۰/۴۷
۱/۵۱	۰/۰۱۷	۱۲/۷	۰/۱۵۸	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۳۲
۱/۵۱	۰/۰۱۷	۱۹/۰۵	۰/۱۳۵	۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۱۰۵	۰/۴	۰/۳۹
۱/۵۱	۰/۰۲۰	۱۲/۷	۰/۱۷۵	۰/۲۹	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۳۶	۰/۳۰
۱/۵۱	۰/۰۲۰	۱۹/۰۵	۰/۱۵۳	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۱۱۵	۰/۴۳	۰/۴۱
۱/۵۱	۰/۰۲۳	۱۲/۷	۰/۱۹۸	۰/۲۹	۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۲۹
۱/۵۱	۰/۰۲۳	۱۹/۰۵	۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۱۳۲	۰/۴۴	۰/۳۸
۱/۵۱	۰/۰۲۸	۱۲/۷	۰/۲۳۸	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۳۷	۰/۲۷
۱/۵۱	۰/۰۲۸	۱۹/۰۵	۰/۲۰۱	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۱۶۵	۰/۴۲	۰/۳۳

حالت آستانه حرکت و آستانه شکست و برای هر ۳ نوع چگالی سنگ چین مورد استفاده افزایش می‌یابد. شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر عدد فرود محاسبه شده از نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر را در برابر پارامتر بدون بعد $\frac{D_{50}}{y_t}$ در شرایط آستانه حرکت و آستانه شکست سنگ چین با چگالی ۲/۶۵ و به ازای دبی‌های مورد استفاده در آزمایشات (۰/۰۱۷، ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۳ و ۰/۰۲۸ مترمکعب بر ثانیه) نشان می‌دهند.

در جدول ۲، پارامتر G_s : چگالی ذرات سنگ چین، Q : دبی جریان، D_{50} : قطر متوسط سنگ چین، y_{tc} و y_{tf} : به ترتیب عمق پایاب در حالت آستانه حرکت و آستانه شکست، Fr_c : عدد فرود آستانه حرکت، Fr_f : عدد فرود آستانه شکست، V_c و V_f : سرعت جریان به ترتیب در حالت آستانه حرکت و آستانه شکست می‌باشند. بررسی پایداری سنگ چین بر اساس عدد فرود جریان: نتایج آزمایشات این تحقیق نشان داد که در هر دبی ثابت، با افزایش مقدار عدد فرود جریان، نسبت $\frac{D_{50}}{y_t}$ در هر دو



شکل ۴- تغییرات $\frac{D_{50}}{y_t}$ بر حسب عدد فرود در آستانه حرکت سنگ چین با $G_s = 2.65$



شکل ۵- تغییرات $\frac{D_{50}}{y_t}$ بر حسب عدد فرود در آستانه شکست سنگ‌چین با $G_s = 2.65$

استخراج رابطه:

(۸) شرایط آستانه حرکت:

$$\frac{D_{50}}{y_t} = \frac{1.63}{(G_s - 1)^{1.12}} Fr^{2.54}$$

(۹) شرایط آستانه شکست:

$$\frac{D_{50}}{y_t} = \frac{0.59}{(G_s - 1)^{1.17}} Fr^{2.23}$$

آنالیز آماری و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج محققین پیشین:

جدول ۳ مجموع مربع خطاهای (RMSE) نتایج به دست آمده از رابطه ۸ و ۹ و همچنین روابط ارائه شده توسط محققین پیشین نسبت به داده‌های مشاهده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

در این قسمت داده‌های حاصل از آزمایش‌ها بر مبنای معادله‌ی بی بعد شماره ۷ مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای دستیابی به رابطه تخمین اندازه قطر ذرات سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس، از نتایج کلیه آزمایش‌های انجام شده استفاده گردید و به منظور ایجاد رابطه مناسب بین پارامترهای عدد فرود جریان (Fr)، نسبت قطر سنگ‌چین به عمق پایاب ($\frac{D_{50}}{y_t}$) و چگالی سنگ-

چین (G_s)، پس از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی در نرم افزار SPSS رابطه ۸ از نتایج حاصل از آزمایشات آستانه حرکت و رابطه ۹ از نتایج آزمایشات آستانه شکست ذرات سنگ‌چین استخراج شد. مقدار ضریب همبستگی این دو رابطه $R^2 = 0.97$ می‌باشد.

جدول ۳- ارائه نتایج آماری تحقیق حاضر و مقایسه با نتایج محققین پیشین

تحقیق ارائه شده	RMSE (آستانه حرکت)	RMSE (آستانه شکست)
تحقیق حاضر	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲
سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴)	۰/۰۱۷	۰/۱۴۱
سایمون و لویس (۱۹۷۱)	۰/۰۳۳	۰/۰۴۴
پاگان - ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای)	۰/۰۴۶	۰/۰۱۳
پاگان - ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره عمودی)	۰/۰۷۰	۰/۲۱۰

ثابت Q ، با کاهش عمق پایاب، اندازه قطر سنگ-چین (D_{50}) که در آستانه حرکت و آستانه شکست قرار گرفته است افزایش می‌یابد.

۳- بر اساس آنالیز ابعادی روابط مناسب برای طراحی قطر سنگ‌چین در دو حالت آستانه حرکت و آستانه شکست ارائه گردید که روابط ارائه شده ضمن سادگی و داشتن ضریب همبستگی بالا، کلیه عوامل موثر در پایداری سنگ-چین را در بر دارند. روابط ارائه شده مبتنی بر عدد فرود جریان، نسبت قطر سنگ‌چین به عمق پایاب و چگالی مخصوص ذرات سنگ‌چین می‌باشند.

۴- مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات محققین پیشین نشان داد که نتایج به دست آمده توسط سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴) و نتایج به دست آمده توسط پاگان-ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای)، مطابقت بسیار خوبی را به ترتیب با نتایج آستانه حرکت و نتایج آستانه شکست این تحقیق نشان می‌دهند. همچنین به منظور استفاده از این روابط در قوس رودخانه، ضرایب تصحیح مناسب ارائه گردید.

تشکر و قدردانی

از مسئولین دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران که امکانات لازم برای انجام این تحقیق را در اختیار نویسندگان قرار دادند و از مهندس وحید گرگیج که در انجام آزمایش‌ها کمک کردند، قدردانی می‌شود.

مقایسه نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج ارائه شده در بخش مقدمه، نشان داد که نتایج به دست آمده توسط سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴) و نتایج به دست آمده توسط پاگان-ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای) به دلیل درصد خطای کمتر، مطابقت بسیار خوبی را به ترتیب با نتایج آستانه حرکت و نتایج آستانه شکست تحقیق حاضر نشان می‌دهند و می‌توان با در نظر گرفتن ضریب تصحیح $0/93$ برای رابطه ارائه شده توسط سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا و ضریب تصحیح $0/96$ برای رابطه ارائه شده توسط پاگان-ارتیز، از این روابط علاوه بر کانال مستقیم برای طراحی سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه واقع در قوس‌های تند نیز استفاده نمود.

نتیجه‌گیری:

با بررسی مطالعات پیشین و انجام آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد موثر بر پایداری سنگ‌چین شناسایی و آزمایش‌ها بر مبنای آنها انجام شد. در زیر نتایج تحقیق به صورت خلاصه آورده شده است:

۱- مشاهده ذرات سنگ‌چین در حین انجام آزمایش‌ها نشان داد که در تمامی آزمایش‌ها، ناپایداری سنگ‌دانه‌ها از دماغه پایین دست تکیه‌گاه شروع شده و با کاهش عمق جریان به بالادست دماغه کشیده می‌شود.

۲- به ازای هر اندازه قطر سنگ‌چین ثابت، با افزایش دبی، عمق پایاب لازم جهت آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگ‌چین افزایش می‌یابد. همچنین به ازای دبی

منابع

- ۱- رضایع. شفاعی بجستان م. کاشفی پور س. م. طالب بیدختی ن. ۱۳۸۸. بهینه‌سازی عرض و عمق قرارگیری تیغه افقی به منظور کنترل فرسایش در قوس‌های همگرای ۹۰ درجه. پایان نامه دکتری. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۳۷۰ص.
- ۲- شفاعی بجستان م. ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. دانشگاه شهید چمران. ۵۴۹ص.
- ۳- صانعی م. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی اثر درصد انسداد در آب‌شستگی موضعی آب‌شکن‌ها. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- غزل ا. منتصری م. وجدانی ن. ۱۳۸۸. ارزیابی روابط عمق آب‌شستگی موضعی در محل تکیه‌گاه‌های پل. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۵- غلامزاده محمودی م. شفاعی بجستان م. ۱۳۸۸. عملکرد طوقه در کاهش نرخ آب‌شستگی پایه استوانه‌ای پل‌ها در قوس رودخانه. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.

- ۶- قربانی ب. حیدرپور م. ۱۳۸۴. کنترل و کاهش آبستگي موضعی با استفاده همزمان از شکاف و سنگ چین. گزارش طرح تحقیقاتی بین دانشگاهی. دانشگاه شهرکرد(شهرکرد) و صنعتی اصفهان(اصفهان). ۱۱۲ص.
- ۷- کیخانی م. حیدرپور م. موسوی س. ف. ۱۳۸۸. بررسی الگوی پوشش سنگ چین در محل احداث گروه پایه های استوانه ای در پل ها. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۳(۴۹):۱۳-۲۹.
- 8- Englund F. 1974. Flow and bed topography in channel bends .ASCE. J. Hydraul.Div. 100(11):1631-1648.
- 9- Ghodsian M., and Mousavi S.K. 2006. Experimental study on bed scour in a 90o channel bend. International Journal of Sediment Research. 21(4):321-328.
- 10- Kikkawa H., Ikeda S., and Kitagawa A. 1976. Flow and bed topography in curved open channels .ASCE. J. Hydraul. Div. 102(9):1342-1372.
- 11- Melville B. W., Coleman S. E. 2000. Bridge Scour. Water Resources Publications. Highlands Ranch. Colo.
- 12- Melville B. W., Van Ballegooy S., Coleman S. E., and Barkdoll B. 2007. Riprap size selection at wing-wall abutments .ASCE. J. Hydraul. Eng. 133(11): 1265-1269.
- 13- Odgaard A. J. 1982. Bed characteristics in alluvial channel bends .ASCE. J. Hydraul.Div. 108(11):1268-1281.
- 14- Pagan-Ortiz J. E. 1991. Stability of rock riprap for protection at the toe of abutments located at the flood plain Rep. No. FHWA-RD-91-057. Federal Highway Administration U.S. Dept of Transportation Washington D.C.
- 15- Raudkivi A. J., and Ettema R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers.ASCE. J. Hydraul. Eng. 109(3):338-350.
- 16- Richardson E. V., and Davis S. R. 1995. Evaluating scour at bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18. 3rd Ed. Rep.No.FHWA-IP-90-017.Office of Technology Applications. HTA-22. Federal Highway Administration U.S. Dept. of Transportation. Washington D.C.
- 17- Shafai Bajestan M. 1991. Critical stability number in rock lined channels. J. Iran Agric. Res. 9(2): 121-138.
- 18- Simons D. B., and Lewis G. L. 1971. Flood protection at bridge crossings. C.S.U. Civil Engineering Rep. No. CER71-72DBS-GL10. prepared for the Wyoming State Highway Dept. in conjunction with the U.S. Dept of Transportation Washington D.C.
- 19- Yen C. 1970. Bed topography effect on flow in a meander .ASCE. J. Hydraul. Div. 96(1):57-73.
- 20- Zarrati A. R., Nazariha M., and 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.

Design of Riprap Size at Bridge Abutment in a River Bend

Abstract

Scouring will be intensified at the river bend due to the existing of secondary flow in comparison with straight channels so attention to the erosion and its control and mitigation at this part of river is very important. The present paper is aimed to study and design the riprap diameter at bridge abutment in a river bend. In this study first a general non dimensional relationship was developed based on dimensional analysis at the point of incipient motion and incipient failure. Then extensive tests were conducted using three types of riprap with specific gravity of 1.51, 2.05 and 2.65 and sizes of 4.75, 9.52, 12.7 and 19.05 millimeter. Each riprap conducted under four different discharges of 0.017, 0.020, 0.023 and 0.028 m³/s. Each test was started from high flow depth and gradually lowered until the first displacement of rock was observed. The flow characteristics at this point were recorded as incipient motion. Incipient failure defined when all rocks are in motion. Applying the obtained data, formulas were developed to be applicable for design of rock size to control of Scour bridge abutment at river bend. The formulas developed in this research were compared with formulas of earlier studies on riprap at abutment for straight channels and suitable correction coefficients were suggested for these relations to be applicable at river bend.

Keywords: Bridge abutment, Riprap, River bend, Scouring, Secondary flow.