

بررسی تأثیر زبری بر پایداری سنگ چین در اطراف پایه استوانه‌ای پل در قوس رودخانه

علیرضا مسجدی^{۱*}، امیر تأییدی^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۱۲ صص: ۱-۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲

چکیده

پل از جمله مهمترین سازه‌های رودخانه‌ای است که در راهسازی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. وقوع آبشستگی در اطراف پایه پل در مسیرهای قوسی یکی از عمده‌ترین دلایل تخریب پل‌ها است. از جمله روش‌های مهار کردن آبشستگی در اطراف پایه پل استفاده از سنگ چین می‌باشد. یکی از روش‌های افزایش پایداری سنگ چین در اطراف پایه‌های پل، ایجاد زبری در بدنه آن است. در این مطالعه، به منظور بررسی پایداری سنگ چین‌ها در اطراف پایه پل، آزمایش‌هایی در یک نهر پایه دار آزمایشگاهی از جنس پلاکسی گلاس با قوس ۱۸۰ درجه انجام پذیرفت. در این تحقیق، با قرار دادن دو پایه استوانه‌ای به طور جداگانه با بدنه صاف و زبر به همراه سنگ چین در اطراف آنها، اقدام به یک گروه آزمایش شد. آزمایش‌ها با استفاده از دو نوع چگالی نسبی سنگ چین و با چهار قطر متفاوت در بده ثابت، در حالت آب زلال انجام گرفت. در هر آزمایش عمق جریان در شرایط آستانه شکست اندازه‌گیری شد، سپس با استفاده از داده‌های بدست آمده عدد پایداری محاسبه گردید. نتایج این تحقیق نشان دادند که پایداری سنگ چین‌ها در اطراف پایه استوانه‌ای به دو عامل عدد فرود در آستانه شکست و قطر نسبی سنگ چین‌ها وابسته است. همچنین، در شرایط یکسان، وجود زبری در پایه استوانه‌ای در قوس باعث افزایش پایداری سنگ چین‌ها در اطراف پایه استوانه‌ای می‌شود.

کلمات کلیدی: عدد پایداری، زبری پایه پل، قوس ۱۸۰ درجه، سنگ چین، عدد فرود

^۱ گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد، اهواز، ایران

^۲ کارشناس ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز

ایمیل: drmasjedi.2007@yahoo.com - ۰۶۱ - ۳۳۳۴۸۴۲۰

مقدمه

هر ساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از پل ها درست زمانی که بیشترین نیاز به آنها وجود دارد، ویران می گردند. یکی از موثرترین عوامل این تخریب ها آبشستگی موضعی اطراف پایه ها در قوس رودخانه می باشد. براساس مطالعات سازمان بزرگراه های ایالات متحده در سال ۱۹۷۳، از تعداد ۳۸۳ مورد خرابی در پل ها، ۲۵٪ مربوط به خرابی پایه ها بوده است. سیلاب سال ۱۹۹۳ در می سی سی پی باعث تخریب ۲۳ پل با تخمین حدود ۱۵ میلیون دلار خسارت شد. در سال ۱۹۹۴ در سیلاب حاصل از طوفان آلبرتو در جورجیا، بیش از ۵۰۰ پل دچار آبشستگی شدید شدند (Richardson et al., 1995).

بر اثر آبشستگی حفره ای در اطراف پایه پل و توسعه آن، ناپایداری و تخریب در پل ایجاد می گردد. آبشستگی موضعی در اطراف پل به این صورت اتفاق می افتد که پس از برخورد جریان به دماغه پل، بر روی پایه با توجه به این که سرعت جریان از بستر رودخانه به طرف سطح آب بیشتر می شود، فشار بیشتری نیز در ترازهای بالاتر بر روی پایه ایجاد می گردد. به این ترتیب شیب فشاری روی پایه از بالا به پایین به وجود می آید که خود باعث ایجاد یک جریان رو به پایین در جلو پایه می شود. جریان رو به پایین همانند یک فشانه عمودی عمل کرده، پس از برخورد به بستر رودخانه ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می شود (Quazi et al., 1973). مقداری از این جریان، که به سمت بالا باز می گردد، در برخورد به جریان عمومی، مجبور به حرکت در جهت جریان شده و مجدداً به پایه برخورد می کند. این چرخش جریان و بازگشت آن در داخل حفره کنده شده، گردابی را تشکیل می دهد که به تدریج در دو طرف پایه، امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب را پدید می آورد، که به آن گرداب نعل اسبی می گویند. تشکیل گرداب نعل اسبی در داخل حفره آبشستگی باعث تسریع در حفر آن گردیده، ذرات جدا شده از بستر به وسیله جریان اصلی رودخانه به پایین دست حمل می شوند (Breusers et al., 1977). بر اثر جدایی جریان در کناره های پایه نیز گرداب هایی تشکیل می شوند که محور آنها عمود بر بستر رودخانه می باشد و به آنها گرداب برخاستگی می گویند. این گرداب ها همانند گرداب ذرات بستر را جدا کرده و در

معرض جریان قرار داده، به انتقال ذرات از جلو و اطراف پایه به سمت پایین دست کمک می کنند. حفر گودال آبشستگی به وسیله گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می یابد تا حجم آب درون حفره آبشستگی زیاد شده و کارمایه گرداب را مستهلک کند. در این حالت عمق آبشستگی به حالت تعادل می رسد (Raudkivi and Ettema, 1983).

روش هایی را که برای مهار کردن آبشستگی موضعی مورد استفاده قرار گرفته اند که می توان آنها را در دو گروه دسته بندی کرد. در گروه اول، قدرت عوامل فرسایش، یعنی جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی کاهش داده می شود، که از جمله این روش ها می توان به استفاده از طوق و شکاف اشاره کرد. در دسته دوم، روش های مهار کردن آبشستگی موضعی، مقاومت مواد بستر بالا برده می شود که استفاده از سنگ چین اطراف پایه یکی از این روش ها می باشد (Chiew, 1992). امروزه یکی از روش هایی که برای محافظت پی پل ها در مقابل آبشستگی مطرح است ترکیبی از روش کاهش قدرت عوامل فرسایشی و مقاوم کردن بستر اطراف پایه پل است. از جمله این روش ها می توان استفاده توام از شکاف و سنگ چین، طوقه و سنگ چین، همچنین ایجاد زبری در بدنه پایه و سنگ چین در پی را بیان نمود.

یکی از واسنج های مهم برای بررسی مقاومت سنگ چین در برابر تنش برشی ناشی از جریان، واسنج بدون بعد عدد پایداری (SN) است. عدد پایداری در واقع همان عدد فرود ذره است که به صورت معادله زیر تعریف می شود:

$$SN = \frac{V}{\sqrt{g(G_s - 1)D50}} \quad (1)$$

که در آن V سرعت متوسط جریان که بر اساس عمق جریان در لحظه، ناپایداری سنگ چین محاسبه می شود، $D50$ قطر متوسط سنگدانه ها، g و G_s به ترتیب شتاب گرانش و چگالی مخصوص سنگدانه ها می باشند. در روابط ارائه شده به وسیله کیخانی و همکاران (۱۳۸۸)، کوزی و پترسون (۱۹۷۳) و یون و همکاران (۱۹۹۵) عدد پایداری، SN دارای مقدار ثابتی است، تعیین اندازه سنگدانه ها تنها وابسته به سرعت متوسط جریان و عمق جریان است.

جدول ۱- روابط پیشنهادی برای تعیین اندازه سنگ‌چین اطراف پایه پل بر اساس عدد پایداری در مسیر مستقیم

محقق	رابطه	N_c
یون و همکاران (۱۹۹۵)	$d_R = 2.7U^2 / (S_G - 1)g$	0.37
کوزی و پترسون (۱۹۷۳)	$\rho U^2 / (\gamma_s - \gamma) d_R = 1.14(d_R/y)^{-0.2}$	$1.14(d_R/y)^{-0.2}$
کیخایی و همکاران (۱۳۸۸)	$\rho U^2 / (\gamma_s - \gamma) d_R = 0.66(d_R/y)^{-0.40}$	$0.66(d_R/y)^{-0.40}$

همچنین شکل پایه آزمایش‌های خود را انجام داد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که محل قرارگیری لایه سنگ-چین دور پایه، اندازه نسبی سنگ‌دانه‌ها بر عدد پایداری تأثیر زیادی دارد.

یون و همکاران (۱۹۹۵)، با اصلاح و توسعه روش پارولا (۱۹۹۳)، روشی دقیق‌تر و جامع‌تر را برای طراحی سنگ‌چین دور پایه ارائه دادند. در این روش اثر واسنج‌های مختلف در پایداری سنگ‌چین به صورت ضرایب تصحیح در مورد عدد پایداری N_c اعمال می‌گردد. رابطه اصلی این روش برای محاسبه اندازه متوسط دانه‌های سنگ‌چین دور پایه استوانه‌ای به صورت زیر است:

$$N_c^* = N_c \cdot K_y^2 \cdot K_D^2 \cdot K_d^{-2} \quad (2)$$

که در آن N_c^* عدد پایداری اصلاح شده و K_y ، K_D و K_d به ترتیب ضرایب اصلاحی برای اعمال اثر عمق جریان، اندازه سنگ‌ها و عمق قرارگیری سنگ‌چین نسبت به تراز سطح بستر می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند (Yoon et al., 1995):

$$N_c^* = 5.3 \times 10^{-5} (d_{50}/y)^{-2.24} \quad (3)$$

$K_y = 0.2(y/b)$ $d \geq 0$ و $y/b \leq 5$	$K_y = 0.2(y/b)$ $d \geq 0$ و $y/b \leq 5$ (۴)
$K_y = 1$ $d \geq 0$ و $y/b > 5$	$K_y = 1$ $d \geq 0$ و $y/b > 5$ (۵)
$K_y = 0.2(y+d)/b$ $d < 0$ و $(y+d)/b \leq 5$	$K_y = 0.2(y+d)/b$ $d < 0$ و $(y+d)/b \leq 5$ (۶)
$K_y = 1$ $d < 0$ و $(y+d)/b > 5$	$K_y = 1$ $d < 0$ و $(y+d)/b > 5$ (۷)
$K_D = (b/25d_{50})^{1.65}$	$K_D = (b/25d_{50})^{1.65}$ (۸)
$K_d = 1 + d/2.5b$ $d > 0$	$K_d = 1 + d/2.5b$ $d > 0$ (۹)
$K_d = 1$ $d \leq 0$	$K_d = 1$ $d \leq 0$ (۱۰)

قطر پایه می‌باشند. سیمارو و همکاران (۲۰۱۱)، تحقیقاتی را در مورد تعیین اندازه سنگ‌چین به منظور حفاظت از پایه‌های پل در مقابل فرسایش انجام دادند. در این تحقیق

در جدول ۱، N_c عدد پایداری، d_R قطر متوسط سنگ دانه‌ها، U سرعت متوسط جریان بر اساس عمق جریان (y) در لحظه ناپایداری سنگ‌چین، ρ جرم مخصوص سیال، γ وزن مخصوص سیال، γ_s وزن مخصوص سنگ دانه‌ها، g شتاب گرانش و S_G چگالی مخصوص سنگ‌دانه‌ها می‌باشند.

کاردوسو و کریستینا (۲۰۰۹)، آزمایش‌هایی را در یک نهر پایه دار مستطیلی با بستر ماسه‌ای و چهار طول مختلف تکیه‌گاه، سه اندازه مختلف سنگ‌چین، دو نوع ماسه مختلف انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که قطر سنگ‌چین به عدد فرود و به طول دیواره تکیه‌گاه بستگی دارد. همچنین، با افزایش تعداد لایه‌های سنگ‌چین می‌توان فرسایش اطراف تکیه‌گاه را به حداقل رساند. پارولا (۱۹۹۳)، به منظور ارائه روشی جهت تعیین اندازه مناسب سنگ‌چین با در نظر گرفتن واسنج‌های مؤثر همچون سرعت و عمق جریان، زبری بستر در بالادست، اندازه سنگ‌چین، تراز قرارگیری آن نسبت به سطح بستر،

در روابط فوق اگر سطح بالایی سنگ‌چین پایین‌تر از بستر باشد، $d > 0$ و اگر بالاتر باشد، $d < 0$ است. همچنین d_{50} قطر متوسط سنگ دانه‌ها، y عمق جریان و b

ها با طول بزرگتر، کارایی بیشتری نسبت به زبری ها با طول کوچکتر در مهار کردن آبشستگی داشتند.

پروان و همکاران (۱۳۹۱) تحقیقی را در خصوص اثر زبری بر پایداری سنگ چین در محل پایه های مستطیلی پل ها در نهري مستقیم انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داد وجود زبری باعث مقاوم تر شدن و افزایش پایداری سنگ چین شده، و در شرایط ترکیب دو روش زبری و سنگ چین، اندازه سنگ چین ها حدود ۲۰ درصد کاهش می یابد.

استفاده از پوشش سنگ چین در اطراف پایه پل باعث تقویت بستر و بالا بردن مقاومت آن در برابر تنش برشی ناشی از جریان استفاده می شوند. یکی از واسنج های مهم برای بررسی مقاومت سنگ چین در برابر تنش برشی ناشی از جریان، واسنج بدون بعد عدد پایداری است. با در نظر گرفتن جریان دائمی و ثابت بودن خصوصیات سیال رابطه ذیل بین واسنج های موثر بر پایداری سنگ چین در حالت تعادل برقرار است:

$$f1(R, B, b, \theta, V, y_t, g, \rho_w, S_0, D_{50}, \rho_s) = 0 \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) شعاع مرکزی قوس، B عرض مجرا، b قطر پایه استوانه ای، θ زاویه موقعیت قرارگیری تکیه گاه در قوس، V سرعت جریان، y_t عمق جریان آب در پائین دست، g شتاب گرانش، ρ_w جرم مخصوص آب، S_0 شیب طولی کف مجرا، D_{50} قطر متوسط سنگ چین و ρ_s جرم مخصوص ذرات سنگ چین می باشد. با صرف نظر کردن از واسنج های ثابت در رابطه (۱۱)، رابطه زیر بدست می آید:

$$f1(V, y_t, g, \rho_w, D_{50}, \rho_s) = 0 \quad (12)$$

با استفاده از انگاره باکینگهام، رابطه (۱۲) به صورت زیر بدون بعد می شود:

$$f2\left(\frac{gy_t}{V^2}, \frac{D_{50}}{y_t}, \frac{\rho_s}{\rho_w}\right) = 0 \quad (13)$$

و یا:

$$f2\left(Fr, \frac{D_{50}}{y_t}, G_s\right) = 0 \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) Fr عدد فرود، D_{50}/y_t قطر نسبی سنگ چین و G_s چگالی نسبی سنگ چین می باشند. در کلیه آزمایش ها، با توجه به آشفتگی جریان در اطراف

اثر هیدرولیک جریان و همچنین فاصله بین پایه ها، مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش ها در یک نهر پایه دار آزمایشگاهی مستطیلی با چهار اندازه سنگ چین با شیب ۷ درصد انجام شدند. نتایج تحقیق نشان دادند که فاصله بین پایه های پل تاثیر کمی را روی اندازه سنگ چین دارد.

پارسا بصیر (۱۳۸۴)، تاثیر استفاده از طوقه را میزان کاهش محدوده سنگ چین اطراف پایه استوانه ای شکل بررسی نمود. طوقه های مورد استفاده دارای قطر $2b$ و $3b$ بود. نتایج این تحقیق نشان دادند که طوقه با پهنای $3b$ در شرایط $b/d_{50} < 5.5$ عملکرد بهتری را نسبت به طوقه با پهنای $2b$ در افزایش مقاومت سنگ چین دور پایه دارد. با قرار گرفتن طوقه در اطراف پایه لزومی به قرار دادن سنگ چین در جلوی پایه نبوده و لایه سنگ چین در پشت پایه کافی است. در این حالت، فاصله لازم برای لایه سنگ چین تا پایه در پشت آن نسبت به پایه بدون طوقه تغییر نمی کند. ابعاد مورد نیاز برای سنگ چین در پایه با طوقه کوچک و بزرگ به ترتیب ۳۱ و ۵۷ درصد نسبت به پایه بدون طوقه و در پایه با طوقه بزرگ ۳۷ درصد نسبت به پایه با طوقه کوچک کمتر است.

نوحانی (۱۳۹۱)، به منظور بررسی پایداری سنگ چین در اطراف پایه پل در قوس ۱۸۰ تحقیقی را انجام داد که در آن با قرار دادن یک پایه استوانه ای به همراه سه طوقه دایره ای با اندازه های مختلف، در چهار موقعیت از قوس و چهار اندازه مختلف سنگچین، پایداری لایه سنگ چین پیرامون پایه پل در حالت آب زلال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان دادند که افزایش قطر نسبی سنگدانه ها باعث ناپایداری آنها می گردد. همچنین، با افزایش عدد فرود در شرایط آستانه حرکت، عدد پایداری کاهش می یابد.

هرمزی و همکاران (۱۳۹۱) تحقیقی را در خصوص تاثیر زبری های مستطیلی شکل بر کاهش عمق آبشستگی موضعی پایه پل در نهر پایه دار مستقیم انجام دادند. در این تحقیق اقدام به بررسی اثر ابعاد زبری های مستطیلی شکل با ضخامت ناچیز بر کاهش میزان آبشستگی موضعی پایه پل پرداخته شد. زبری های بکار رفته در آزمایش ها با طول و عرض های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و عمل زبری ها با حالت پایه بدون زبری مقایسه گردیدند. نتایج حاصله نشان دادند که زبری

شود. لذا این تحقیق با هدف مهار کردن آبشستگی در اطراف پایه پل با استفاده از سنگ چین انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر زبری بر پایداری سنگ چین در اطراف پایه استوانه‌ای، یک نمونه فیزیکی تهیه شد. آزمایش‌ها در یک نهر پایه دار از جنس پلاکسی گلاس قوسی شکل با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه، شعاع مرکزی m و $R=1/2$ و عرض $B=0.16m$ انجام شد. انحنای نسبی قوس $R/B=1/4$ بوده که قوس را در رده قوس‌های ملایم قرار می‌دهد. نهر مستقیم ورودی بطول ۹/۱ متر به یک نهر پایه دار با قوس ۱۸۰ درجه متصل می‌گردد. این نهر قوسی شکل به وسیله نهر پایه دار مستقیم دیگری به طول ۵/۵ متر به دریچه مهار کننده عمق جریان، سپس مخزن خروجی متصل می‌شود (شکل ۱).

طبق توصیه‌های چپو و ملویل (۱۹۸۷) تنگ شدگی در پایه در عرض نهر نباید از ۱۰ درصد عرض نهر پایه دار بیشتر باشد، لذا در کلیه آزمایش‌ها از یک پایه

تکیه گاه، جریان از نوع متلاطم بوده و عدد رینولدز حذف گردید. از ترکیب سه وا سنج رابطه ۱۴، رابطه عدد فرود ذره یا عدد پایداری به صورت زیر بدست می‌آید:

$$SN = \frac{V}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} \quad (15)$$

با توجه به رابطه ۱۴ و ۱۵ خواهیم داشت:

$$f3\left(Fr, \frac{D_{50}}{y_t}, G_s, SN\right) = 0 \quad (16)$$

با توجه به این که تاکنون تحقیقات انجام گرفته در خصوص استفاده توام از زبری و سنگ چین، در مسیر مستقیم بوده، از آنجا که الگوی جریان در مسیر مستقیم با مسیرهای غیر مستقیم متفاوت است، لذا در این تحقیق اقدام به بررسی اثر زبری بدنه پایه پل بر پایداری سنگ چین اطراف آن با هدف افزایش پایداری و کاهش اندازه سنگ چین‌ها به منظور با صرفه کردن طرح‌ها شده است. طبق تحقیقات آزمایشگاهی صفرزاده و همکاران (۱۳۸۳) و مسجدی و همکاران (۱۳۸۸)، در نیمه اول قوس ۱۸۰ درجه و در موقعیت ۶۰ تا ۷۰ درجه بیشترین جریان‌های ثانویه و آبشستگی در این موقعیت ایجاد می



شکل ۱- نقشه مسطه نهر پایه دار قوسی شکل و موقعیت قرارگیری پایه

مخصوص سنگ چین‌ها و اندازه قطر متوسط آنها در آزمایشگاه مکانیک خاک با استفاده از روش ارشمیدس تعیین شدند. همچنین، چگالی و اندازه سنگ چین‌ها در آزمایش‌ها طوری انتخاب شدند که در بده و عمق مورد نظر جا به جا شوند (جدول ۱).

به تو صیه راودکیوی و اتما (۱۹۸۳)، برای جلوگیری از تشکیل جین قطر متو سط ذرات باید از ۰/۷ میلی متر بزرگتر باشد. همچنین، برای حذف تاثیر غیر یکنواختی رسوبات بر آبشستگی، انحراف معیار ذرات باید کمتر از

استفاده شد. همچنین، به منظور ایجاد زبری در بدنه پایه استوانه‌ای، یک لوله استوانه‌ای دیگر با قطر ۶ سانتی متر از جنس PVC تهیه و برای ایجاد زبری در بدنه آن، از زبری ثابت با ابعادی به طول ۳/۸b (۲۲/۵ میلی متر) و عرض ۴/۱۶b (۱۵ میلی متر) در فواصل قرارگیری هر ردیف زبری در طول و عرض پایه به فواصل ۳/۴b (۴۵ میلی متر) به صورت زیگزاک در طول و به صورت عمود بر پایه، از جنس پلاکسی گلاس استفاده شد. سنگ چین‌های بکار رفته در این تحقیق از مصالح طبیعی گرد گوشه با دو نوع چگالی نسبی ۱/۷ و ۲/۱ با اندازه قطر متوسط ۴/۷۶، ۹/۵۲، ۱۲/۷، ۱۹/۱ میلی متر استفاده شد. چگالی

جدول ۱- مشخصات سنگ چین در اطراف پایه ها

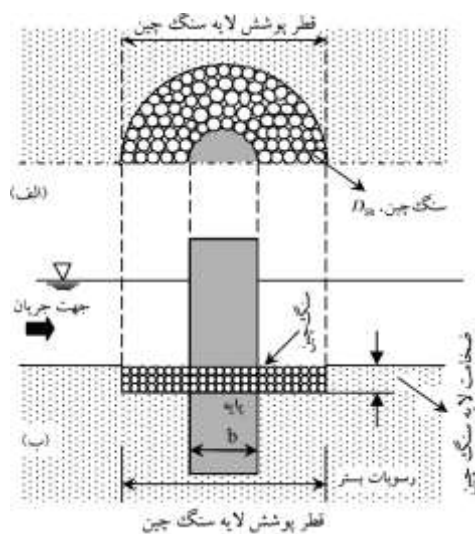
چگالی نسبی سنگ چین	اندازه متوسط سنگ چین (mm)
۱/۷	۱۹/۱ ، ۱۲/۷ ، ۹/۵۲ ، ۴/۷۶
۲/۱	۱۹/۱ ، ۱۲/۷ ، ۹/۵۲

۱/۳ باشد. با توجه به این موارد یک لایه از ماسه طبیعی رودخانه ای با قطر متوسط معادل ۱/۶ میلی متر و ضریب انحراف معیار معادل ۱/۲۴ انتخاب شد و در لایه ای به ضخامت تقریبی ۱۵ سانتی متر جهت انجام آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفت. طبق توصیه الیوتو و هاگر (۲۰۰۲)، برای جلوگیری از اثرات زبری عمق آب را بیشتر از ۲۰ میلی متر پیشنهاد نموده اند، بنابراین در کلیه آزمایش ها، عمق آب بالاتر از ۲۰ میلی متر انتخاب گردید. با توجه به این که آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال انجام شد، لذا به منظور جلوگیری از فرسایش و انتقال رسوب ها در بالادست پایه پل، سرعت متوسط جریان باید کمتر از سرعت بحرانی ($u < u_c$) باشد. در کلیه آزمایش ها نسبت سرعت برشی به سرعت برشی بحرانی ۰/۹۳ بود، لذا کلیه آزمایش ها در بده ۲۷ لیتر بر ثانیه انجام شدند. بده مورد نیاز به وسیله سرریز مثلثی ۶۰ درجه در ابتدای ورودی نهر پایه دار اندازه گیری شد.

برای تعیین مساحت سنگ چین در اطراف پایه استوانه ای، آزمایش زمان تعادل بدون قرارگیری سنگ چین در اطراف دو پایه زیر و صاف و به منظور بررسی حداکثر ابعاد گودال آبشستگی اطراف پایه ها انجام شد. در این بررسی، طی یک آزمایش ۱۶ ساعته برای هر یک از پایه ها به طور جداگانه، بدون سنگ چین، در یک لایه از ماسه به ضخامت تقریبی ۱۵ سانتی متر با بده حداکثر ۲۷ لیتر بر ثانیه در موقعیت ۷۰ درجه در قوس در عمق جریان ۱۰ سانتی متر انجام گردید. در انتهای آزمایش، تلمبه خاموش و دریچه انتهایی بسته شد تا آب موجود در نهر پایه دار به آرامی زهکشی گردیده و تاثیری بر روی پستی و بلندی بستر ایجاد نشود. پس از تخلیه کامل آب از درون نهر پایه دار، محدوده چاله آبشستگی در اطراف دو پایه صاف و زبر به وسیله عمق سنج با دقت یک میلی متر اندازه گیری شد. در انتهای آزمایش، پس از زهکشی نهر پایه دار، محدوده چاله آبشستگی در اطراف پایه استوانه ای صاف برای انجام آزمایش ها به صورت دایره ای و با قطر ۲۵

سانتی متر و برای پایه زیر ۲۰ سانتی متر بدست آمد که در نتیجه شکل سنگ چین در اطراف پایه ها بصورت دایره ای و با قطر های تعیین شده انتخاب گردید.

بر اساس مطالعات ملویل و همکاران (۲۰۰۷)، شکل چیدمان سنگ چین در اطراف پایه استوانه ای به صورت دایره ای و هم تراز مصالح بستر در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به معیار ارائه شده به وسیله ملویل و همکاران (۲۰۰۷)، ضخامت لایه سنگ چین دو برابر قطر متوسط سنگ چین انتخاب شد (شکل ۲).



شکل ۲- مشخصات پایه استوانه ای و سنگ چین در اطراف آن (الف- نقشه مسطح؛ ب- مقطع)

کلیه آزمایش ها در این تحقیق در بده ثابت ۲۷ لیتر بر ثانیه و در شرایط زیر بحرانی انجام شدند. بده مورد نیاز به وسیله سرریز مثلثی ۶۰ درجه در ابتدای ورودی نهر پایه دار اندازه گیری شد. در ابتدای هر آزمایش، پایه استوانه ای مورد نظر در موقعیت ۷۰ درجه در قوس نصب و سپس با استفاده از ارابه متحرک، رسوبات بستر نهر پایه دار تحت شیب ثابت مسطح گردیدند. سپس سنگ چین مورد نظر با ضخامت $2D50$ و هم تراز با مصالح بستر در اطراف پایه ها قرار داده شد (شکل ۳). پیش از راه اندازی تلمبه، دریچه انتهایی بسته شد، سپس آب زلال به آرامی به درون نهر پایه دار هدایت گردید تا از ایجاد جین و ناهمواری در سطح بستر جلوگیری شود. مدت زمان اشباع نهر پایه دار بین ۲۰ تا ۳۰ دقیقه بود. پس از بالا آمدن آب و اطمینان از مرطوب شدن رسوب ها بعد از گذشت چند دقیقه، تلمبه با بده کمی راه اندازی شد و به آرامی به وسیله شیر فلکه اصلی روی لوله ورودی به حوضچه آرامش، بده به میزان



شکل ۴- پایه استوانه ای و سنگ چین اطراف آن بعد از آزمایش

بحث و نتایج

در کلیه آزمایش‌ها پس از تنظیم بده، عمق جریان در حالت آستانه شکست اندازه‌گیری شد. مطابق جدول ۳ بازا بده ثابت و عمق جریان اندازه‌گیری شده در حالت آستانه شکست و همچنین در قطر و چگالی‌های مورد استفاده برای ذرات سنگ چین، مقادیر سرعت متوسط جریان، عدد فرود آستانه شکست و عدد پایداری در حالت آستانه شکست در دو پایه استوانه ای صاف و زیر محاسبه شدند.

در جدول ۳ و اسنچ Fr_f عمق جریان در آستانه شکست، Fr_f عدد فرود در آستانه شکست و SN_f عدد پایداری در آستانه شکست می‌باشند.

مورد نظر رسانده شد. پس از تنظیم بده مورد نظر، عمق جریان به وسیله دریچه در پایین دست به آهستگی کاهش داده شد تا شرایط لازم برای جابه‌جایی کم ذرات سنگ چین بوجود آید. پس از اطمینان از ثابت بودن عمق جریان در طول نهر پایه دار نحوه حرکت ذرات سنگ چین به صورت چشمی بررسی گردید. در شرایطی که ذرات سنگ چین به صورت گروه شروع به حرکت کردند، این شرایط را آستانه شکست گفته و در این لحظه عمق جریان در پایین دست نیز به عنوان عمق آستانه شکست اندازه‌گیری شد. (شکل ۴). در انتهای هر آزمایش، تلمبه خاموش و دریچه انتهایی مسدود گردید تا آب موجود در نهر پایه دار به آرامی زهکشی شد و تاثیری بر پستی و بلندی بستر ایجاد نگردد.



شکل ۳- پایه استوانه ای و سنگ چین اطراف آن قبل از آزمایش

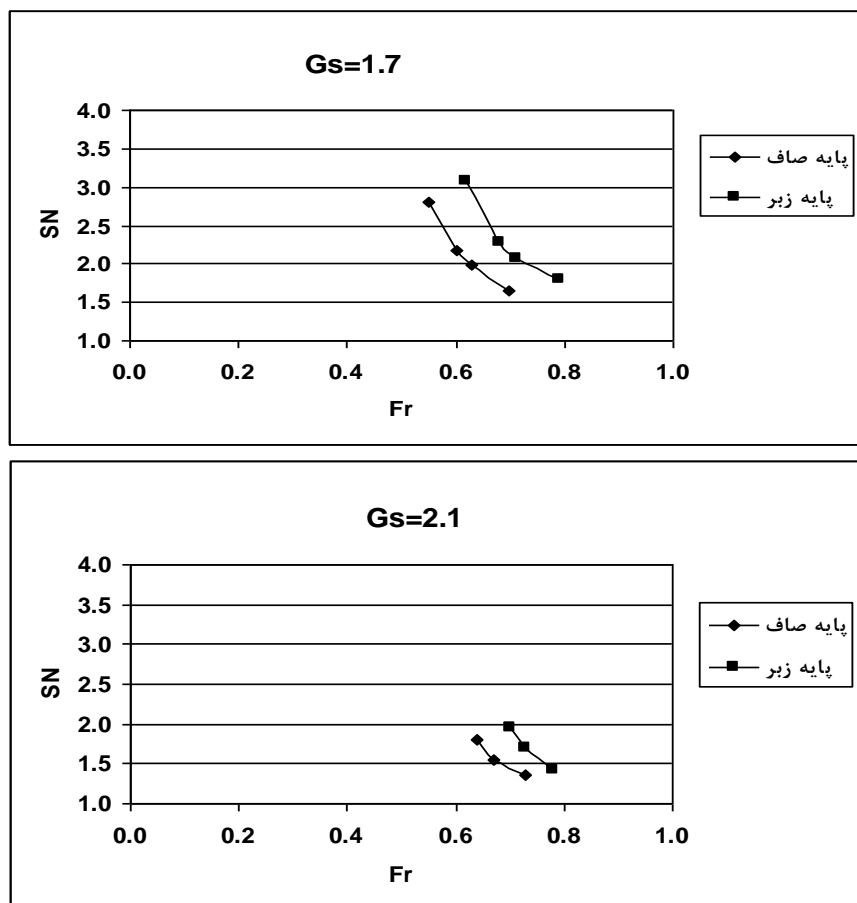
جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش آستانه شکست سنگ چین

G_s	Q (m^3/s)	$D50$ (mm)	$D50/y_t$ (پایه صاف)	$D50/y_t$ (پایه زبر)	Fr_t (پایه صاف)	Fr_t (پایه زبر)	SN_t (پایه صاف)	SN_t (پایه زبر)
۱/۷	۰/۰۲۷	۴/۷۶	۰/۰۵۴	۰/۰۵۹	۰/۵۵	۰/۶۲	۲/۸۰	۳/۰۷
۱/۷	۰/۰۲۷	۹/۵۲	۰/۱۱۷	۰/۱۲۴	۰/۶۰	۰/۶۸	۲/۱۷	۲/۲۹
۱/۷	۰/۰۲۷	۱۲/۷	۰/۱۶۴	۰/۱۷۲	۰/۶۳	۰/۷۱	۱/۹۸	۲/۰۶
۱/۷	۰/۰۲۷	۱۹/۱	۰/۲۵۴	۰/۲۷۴	۰/۷۰	۰/۷۹	۱/۶۶	۱/۸۰
۲/۱	۰/۰۲۷	۹/۵۲	۰/۱۲۲	۰/۱۳	۰/۶۴	۰/۷۰	۱/۸۰	۱/۹۵
۲/۱	۰/۰۲۷	۱۲/۷	۰/۱۵۲	۰/۱۶	۰/۶۷	۰/۷۳	۱/۵۴	۱/۷۰
۲/۱	۰/۰۲۷	۱۹/۱	۰/۱۸	۰/۱۸۴	۰/۷۳	۰/۷۸	۱/۳۶	۱/۴۲

پایداری در آستانه شکست در دو پایه صاف و زبر با افزایش عدد فرود در آستانه شکست، کاهش می یابد. همچنین در دو چگالی، عدد پایداری در پایه زبر بیشتر از پایه صاف مشاهده می شود. وجود زبری در بدنه پایه باعث کاهش قدرت جریان های رو به پایین و گرداب های نعل اسبی می گردد، در نتیجه، برای شرایط یکسان در پایه استوانه ای صاف و زبر، به دلیل ضعیف شدن قدرت جریان های گردابی رو به پایین بر اثر وجود زبری، پایداری در پایه زبر بیشتر از پایه صاف خواهد بود.

پایداری سنگ چین بر اساس عدد فرود در دو پایه استوانه ای

شکل ۵ مقایسه پایداری سنگ چین بر اساس عدد فرود در دو پایه استوانه ای صاف و زبر در بده ثابت ۲۷ لیتر بر ثانیه و در دو چگالی نسبی ۱/۷ و ۲/۱ در حالت آستانه شکست نشان می دهد. نتایج حاصله از نمودارها نشان می دهند که عدد فرود در آستانه شکست عامل موثر در پایداری سنگ چین ها بوده و در هر دو چگالی، عدد

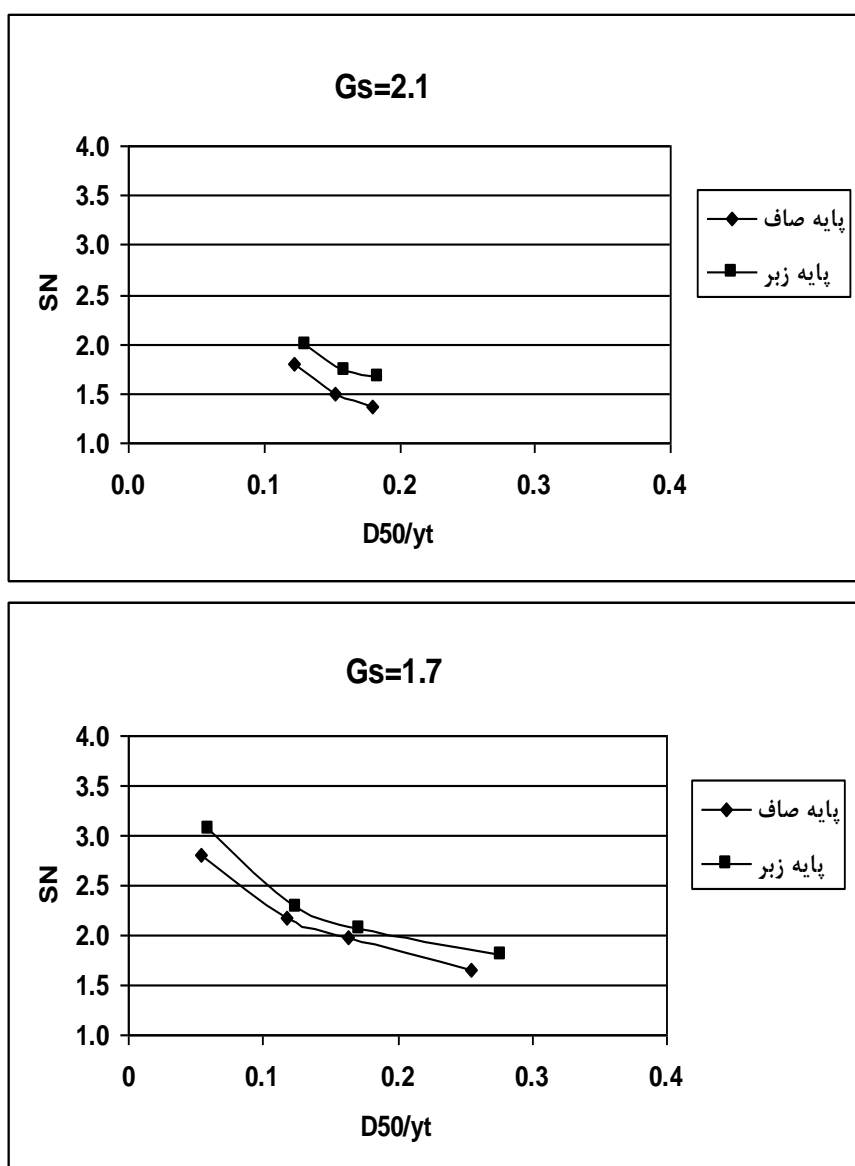


شکل ۵- تاثیر عدد فرود بر پایداری سنگ چین در حالت آستانه شکست در چگالی های مختلف

پایداری سنگ چین بر اساس قطر نسبی سنگدانه ها در دو پایه استوانه‌ای

شکل ۶ مقایسه پایداری سنگ چین را بر اساس قطر نسبی سنگدانه‌ها در دو پایه استوانه‌ای صاف و زبر در بده ثابت ۲۷ لیتر بر ثانیه و در دو چگالی نسبی ۱/۷ و ۲/۱ در حالت آستانه شکست نشان می‌دهد. نتایج حاصله از نمودارها نشان می‌دهد که قطر نسبی سنگدانه‌ها نیز عامل موثری در پایداری سنگ چین‌ها بوده و در هر دو چگالی،

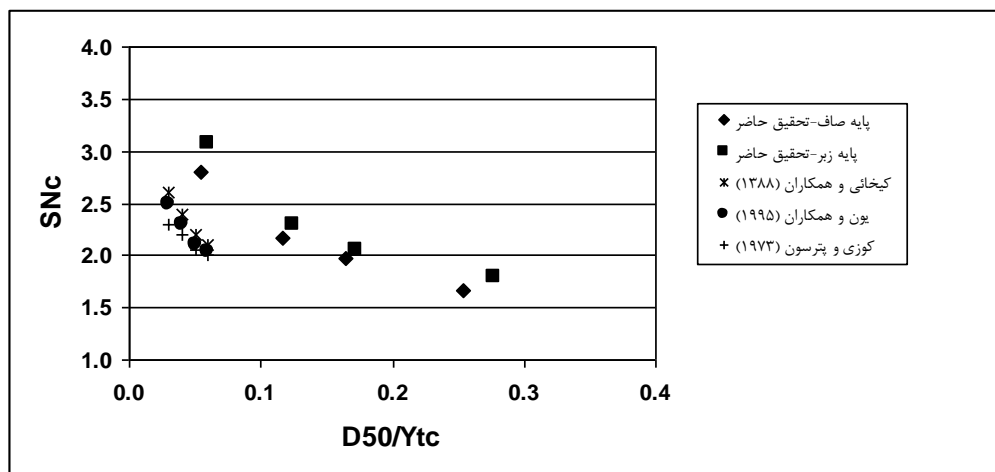
عدد پایداری در آستانه شکست در دو پایه صاف و زبر با افزایش قطر نسبی سنگدانه، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش اندازه سنگدانه‌ها، از درگیری آنها نسبت به هم کاسته و در نتیجه پایداری آنها کاهش می‌یابد. همچنین، در دو چگالی نسبی، در کلیه قطرهای نسبی سنگدانه، عدد پایداری در پایه زبر به مراتب بیشتر از پایه صاف مشاهده می‌شود. وجود زبری باعث کاهش قدرت جریان‌های گردابی رو به پایین شده و در نتیجه باعث افزایش پایداری سنگ چین‌ها در پایه زبر می‌گردد...



شکل ۶-تأثیر قطر نسبی سنگدانه‌ها بر پایداری سنگ چین در حالت آستانه شکست در چگالی‌های مختلف

استفاده شد. با توجه به شکل ۷، عدد پایداری اندازه گیری شده برای قطرهای نسبی مختلف این تحقیق با نتایج محققین دیگر همسو می باشد.

به منظور مقایسه تاثیر قطر نسبی سنگدانه ها بر پایداری سنگ چین در تحقیق حاضر با سایر بررسی های محققین، از نتایج تحقیقات کیخانی و همکاران (۱۳۸۸)، یون و همکاران (۱۹۹۵) و کوزی و پترسون (۱۹۷۳)



شکل ۷- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با بررسی های سایر محققین

هر چه چگالی سنگ چین ها بیشتر شود، وزن مخصوص آنها بزرگتر و پایداری آنها در مقابل جریان بیشتر می شود، بنابراین، در این حالت سنگ دانه ها به سرعت بیشتری از جریان برای شکست و گسیختگی نیاز دارند. همچنین وجود زبری در پایه استوانه ای باعث افزایش پایداری در چگالی و قطرهای مختلف سنگ چین می شود و در شرایط یکسان، وجود زبری در پایه استوانه ای در قوس باعث افزایش پایداری حداکثر ۱۰ درصد در چگالی نسبی ۱/۷ و حداکثر ۲۳ درصد در چگالی نسبی ۲/۱ می شود.

بر آورد در صد افزایش پایداری سنگ چین بر اثر زبری پایه

جدول ۴ درصد افزایش پایداری سنگ چین را در اطراف پایه استوانه ای صاف و زبر و در شرایط یکسان بده ثابت ۲۷ لیتر بر ثانیه و در دو چگالی نسبی ۱/۷ و ۲/۱ در حالت آستانه شکست نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که در درصد پایداری سنگ چین ها در چگالی نسبی ۲/۱ به مراتب بیشتر از چگالی نسبی ۱/۷ است، به عبارت دیگر

جدول ۴- درصد افزایش پایداری سنگ چین در چگالی های مختلف

$D_{50}(mm)$	۴/۷۶	۹/۵۲	۱۲/۷	۱۹/۱
درصد پایداری	۹/۶	۵/۵	۴	۸/۴
$(G_s = 1.7)$				
درصد پایداری				
$(G_s = 2.1)$	---	۱۱/۱	۱۶	۲۲/۸

نتیجه گیری

در این تحقیق، آزمایش‌ها جهت تعیین اثر زبری بر پایداری سنگ چین در اطراف پایه‌ی استوانه‌ای در قوس ۱۸۰ درجه در بده و زبری ثابت و ۲ چگالی نسبی و چهار قطر سنگ چین متفاوت انجام گرفتند. متغیرهای موثر در این تحقیق چگالی و قطر سنگ چین بودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که در دو پایه‌ی استوانه‌ای صاف و زبر در هر چگالی با بده ثابت، با افزایش عدد فرود در شرایط آستانه شکست، عدد پایداری کاهش می‌یابد. به ازای بده ثابت در دو پایه‌ی استوانه‌ای صاف و زبر، با افزایش قطر نسبی سنگدانه‌ها، عدد پایداری در حالت آستانه شکست کاهش می‌یابد. هر چه چگالی سنگ چین‌ها در دو پایه‌ی استوانه‌ای صاف و زبر بیشتر گردد، وزن مخصوص آنها بزرگتر و پایداری آنها در مقابل جریان فزونی می‌یابد. در شرایط یکسان، وجود زبری در پایه‌ی استوانه‌ای در قوس باعث افزایش پایداری حداکثر ۱۰ درصد و حداقل ۴ درصد در چگالی ۱/۷ و حداکثر ۲۳ درصد و حداقل ۱۱ درصد در چگالی ۲/۱ می‌شود.

تشکر و قدردانی

از مساعدت مسئولین محترم دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز بمنظور قرار دادن امکانات، تسهیلات و کمکهای مالی در این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- ۵) مسجدی، ع. و ا. مرادی. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی اثر موقعیت تک آبشکن بر عمق آبشستگی اطراف آن در خم ۱۸۰ درجه، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۱۳(۴۳):۵۰-۵۱.
- ۶) نوحانی، ا. ۱۳۹۱. کنترل آبشستگی پایه پل در فلوم ۱۸۰ درجه با روش‌های سنگ چین و طوقه، پایان‌نامه دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان، ۱۸۹ ص.
- ۷) هرمزی، م.، ن. طالب بیدختی و م. شفاعی بجستان. ۱۳۹۱. تاثیر ابعاد زبری‌های مستطیلی شکل بر کاهش عمق آبشستگی موضعی پایه پل، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه، دانشگاه ارومیه.
- 8) Breusers, H.N.C., G. Nicollet and H.W. Shen. 1977. Local scour around cylindrical piers. J. Hydraul. Res. 15:211-252.
- 9) Cardoso, A. H. and M.S. Cristina. 2009. Protecting vertical-wall abutment with riprap mattresses. J. Hydraul. Eng. 135:457-465.
- 10) Chiew, Y.M, B.W. Melville. 1987. Local scour around bridge piers. J. Hydraul. Res. 25:15-26.
- 11) Chiew, Y.M. 1992. Scour protection at bridge piers. J. Hydraul. Eng., ASCE, Vol. 118: 260-1269.
- 12) Melville, B. W., S. Van Ballegooy, S. E. Coleman. And B. Barkdoll. 2007. Riprap size selection at wing-wall abutment. ASCE, J. Hydraul. Eng. 133:1265-1269.
- 13) Oliveto, G. and W. H. Hager. 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. J. Hydraul. Eng., ASCE, 128:811-820.
- 14) Parola, A. C. 1993. Stability of riprap at bridge piers. J. Hydraul. Eng. ASCE 119:1080-1093.
- 15) Quazi, M.E. and A.W. Peterson. 1973. A method for bridge pier riprap design. Pro. First Can. Hydraul. Conf., CSCE, Edmonton, AB, pp: 96-106.
- 16) Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. J. Hydraul. Eng., ASCE, 109:338-350.
- 17) Raudkivi, A.J. 1998. Loose boundary hydraulics. 4th Edition. Rotterdam; Brookfield, VT: Balkema. 496 p.
- 18) Richardson, E. V. and S. R. Davis. 1995. Evaluating scour at bridges. 3rd edition, Hydraul. Eng. Circ. No. 18, Publ. No FHWA IP-90-017, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- 19) Simarro, G., Ch. Chreties and L. Teixeira. 2011, Riprap sizing for pile group. J. Hydraul. Eng., doi:10.1061/(ASCE)HY.1943.1943-7900.0000458.

- ۱) پارسا بصیر، ح. ۱۳۸۴. حفاظت پایه‌های پل در مقابل آبشستگی با ترکیب سنگ چین و طوقه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۲) پروان، ع. و م. شفاعی بجستان. ۱۳۹۱. اثر زبری بر پایداری سنگ چین در محل پایه‌های مستطیلی پل‌ها، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳) صفرزاده گندشمین، ا. ۱۳۸۳. شبیه‌سازی الگوی جریان در آبگیری جانبی از قوس ۱۸۰ درجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۴) کی‌خانی، م.، م. حیدرپور و س. ف. موسوی. ۱۳۸۸. بررسی الگوی پوشش سنگ چین در محل احداث گروه پایه‌های استوانه‌ای در پل‌ها، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۳(۴۹):۱۳-۲۹.

- 20) Yoon, T. H., S. B. Yoon and K. S. Yoon. 1995. Design of riprap for scour protection around bridge piers. 26th IAHR Congress, UK, 1: 105-110.