

طراحی بهینه گستره سنگچین با استفاده از ابعاد مختلف سنگ در اطراف پایه پل با مقطع مستطیلی با طوق محافظ و بدون آن

مجتبی کریمائی طبرستانی¹، حمیدرضا آذرمیدخت²، امیر رضا زراتی^{3*}، صادق انوری²

1- پژوهشگر پسا دکترا، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و عضو هیئت علمی دانشگاه شهبا دانش قم

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

3- استاد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*zarrati@aut.ac.ir

چکیده - استفاده از سنگچین به عنوان یکی از معمولترین روشهای کنترل و کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل مطرح می‌باشد. طراحی اندازه سنگچین بر اساس بزرگ‌ترین نیروی ناشی از جریان که فقط بر یک محدوده کوچک در اطراف پایه پل به‌عنوان ناحیه بحرانی اعمال می‌شود، انجام می‌گیرد. در حالیکه گستره لایه سنگچین در اطراف پایه پل محدوده وسیعی را، مخصوصاً در پایه‌های مستطیلی در بر می‌گیرد. در نتیجه با توجه به اینکه شدت نیروهای جریان در نواحی مختلف اطراف پایه متفاوت می‌باشد، می‌توان برای نیل به طراحی بهینه و اقتصادی، از سنگ‌هایی با ابعاد مختلف در محدوده گستره سنگچین استفاده نمود که هدف از تحقیق حاضر می‌باشد. بدین منظور، مطالعه آزمایشگاهی برای برآورد ابعاد مختلف سنگچین بر روی پایه‌های پل با مقطع مستطیلی و در دو حالت محافظت شده با طوق و بدون طوق انجام گرفته است. نسبت ابعادی (نسبت طول به عرض) پایه‌های مورد مطالعه در محدوده 3 تا 7 قرار دارد که تحت زوایای قرارگیری متفاوت (بین صفر تا 20 درجه) نسبت به راستای جریان نصب شده‌اند. نتایج نشان داد که در حالت پایه‌های بدون محافظ مستقیم و نسبت طول به عرض مختلف تنها کفایت سنگچین طراحی (بر اساس بزرگترین نیروی جریان) در 8% سطح گستره سنگچین دور پایه ریخته شود و در مابقی مناطق، اندازه پایدار سنگ را می‌توان به میزان 38% کاهش داد. همچنین با افزایش زاویه قرارگیری پایه به‌علت گسترده‌تر شدن ناحیه بحرانی، محدوده قرارگیری سنگچین طراحی افزایش می‌یابد. در نهایت آزمایش‌ها نشان داد که در حالت پایه‌های محافظت شده با طوق، به‌علت حفاظت از بستر دور پایه توسط طوق، محدوده سنگچین طراحی نسبت به حالت بدون طوق کمتر می‌باشد که میزان کاهش بستگی به زاویه قرارگیری پایه دارد.

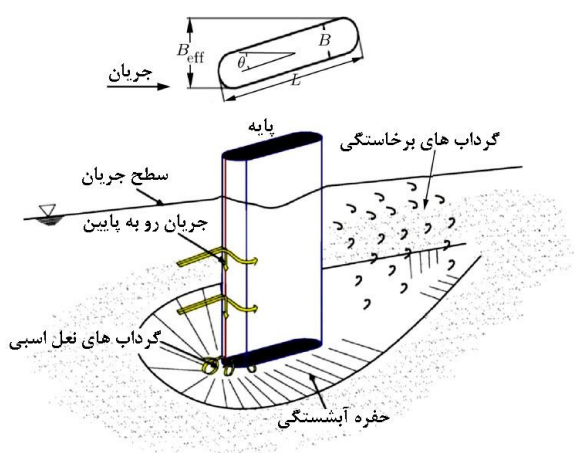
کلیدواژگان: پایه پل، آبشستگی موضعی، طراحی بهینه سنگچین، طوق محافظ، ناحیه بحرانی شکست سنگچین.

1- مقدمه

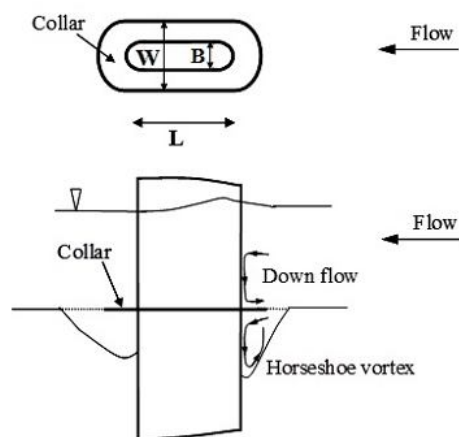
آبشستگی در اطراف پایه پل یکی از مهمترین عوامل تخریب پل‌ها و پارامتر مهمی در هزینه ساخت و نگهداری آنها می‌باشد. به دلیل برخورد جریان آب به پایه پل و ایجاد پدیده جدا شدگی، که پیچیدگی میدان جریان و تشکیل گردابه در اطراف پایه پل را به همراه دارد،

آبشستگی موضعی در بستر اطراف پایه پل رخ می‌دهد. با توجه به شکل 1، ساختارهای مختلف جریان در اطراف پایه پل مستطیلی شکل با دماغه گرد شامل جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی در وجه جلوی پایه و گرداب‌های برخاستگی ناشی از جدایش جریان از پایه پل در کناره‌ها و پایین‌دست پایه می‌باشند (Melville and Raudkivi,

اطراف پایه‌های پل مطرح می‌باشد.



شکل 1 تصویر شماتیک از گردابه‌های ایجاد شده در اطراف پایه پل مستطیلی شکل با دماغه گرد



شکل 2 آبستگي و الگوی جریان در اطراف پایه مستطیلی شکل با دماغه گرد محافظت شده با طوق (Zarrati et al., 2004)

طراحی لایه سنگچین شامل انتخاب اندازه پایدار سنگچین، طراحی گستره و ضخامت مناسب لایه سنگچین می‌باشد (Chiew, 1992; Karimae and Zarrati, 2013). در زمینه تعیین اندازه پایدار و گستره سنگچین اطراف پایه پل با مقطع دایره‌ای مطالعات زیادی انجام گرفته است (Richardson and Davis, 2001, Chiew, 1992). طراحی لایه سنگچین در اطراف پایه‌های با مقطع مستطیلی در مقایسه با پایه‌های دایره‌ای دارای دو پارامتر اضافی شامل زاویه

(1977). نتایج تجربی نشان داده است که به‌علت وجود مجموعه گردابه‌ها، اطراف پایه‌های پل در معرض نیروهای حاصل از جریان و گردابه‌های حاصل از آن می‌باشند (Karimae and Zarrati, 2013; Raudkivi, 1998). بدیهی است که این نیروها با دور شدن از اطراف پایه کاهش می‌یابند. به علت خطرات تخریب پل در اثر آبستگي، روش‌های زیادی در سه دهه اخیر برای پیش‌گیری از آبستگي ارائه گردیده است. بطور کلی روش‌های محافظت از آبستگي به دو روش تقسیم می‌شوند. در روش اول کاهش نیروهای وارد از طرف جریان به بستر اطراف پایه مد نظر است که در آن با استفاده از تجهیزات مناسب، الگوی جریان در اطراف پایه را تغییر می‌دهند. در این روش می‌توان از تجهیزاتی نظیر طوق (Tafarojnoruz et al., 2012; Kumar et al., 1999)، قرار دادن شمع‌های حفاظتی در بالادست پایه پل (Melville and Hadfield, 1999)، شیارها (Grimaldi et al., 2009; Chiew, 1992) و صفحات مستغرق (Odgaard and Wang, 1987) نام برد. در روش دوم با استفاده از مصالح مناسب مقاومت بستر اطراف پایه پل در مقابل آبستگي افزایش داده می‌شود. مصالحی نظیر سنگچین، گابیون، بلوک‌های بسته شده با کابل، قالب‌های بتنی پیش ساخته (تتراپاد) و غیره (Chiew, 1995; Karimae et al., 2015). در میان تجهیزات مورد استفاده برای تغییر در الگوی جریان، استفاده از طوق‌های متصل به پایه مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. طوق‌ها باعث کاهش شدت جریان رو به پایین و گردابه نعل اسبی در زیر طوق گردیده که در نهایت منجر به کاهش عمق آبستگي موضعی می‌شوند (شکل 2). اثرگذاری طوق متناسب با ابعاد و موقعیت قرار گیری آن در پایه پل نسبت به بستر می‌باشد (Karimae and Zarrati, 2011; Zarrati et al., 2004, 2006, 2010). اگرچه طوق از اثرات جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی پیشگیری می‌نماید، اما قادر به جلوگیری از آبستگي ناشی از گرداب‌های برخاستگی در پایین‌دست پایه نمی‌باشد.

در میان راه‌کارهای متنوع پیشنهاد شده برای بالا بردن مقاومت بستر، استفاده از سنگچین به عنوان یکی از معمول‌ترین روش‌های کنترل و کاهش آبستگي در

شده با طوق و بدون طوق انجام گرفته است. در نهایت روش طرح بهینه گستره سنگچین با ابعاد مختلف در اطراف پایه پل با شرایط متفاوت ارائه شده است.

2- معادله طراحی سنگچین

کریمایی و زراتی (2013) و (1393) و همچنین کریمایی و زراتی (2015) پس از انجام تحقیقات آزمایشگاهی گسترده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه امیرکبیر معادله‌ای تجربی برای طراحی اندازه پایدار دانه‌های سنگچین در اطراف پایه‌های پل با مقطع دایره‌ای و یا مستطیلی با دماغه گرد به صورت مستقیم و یا تحت زاویه با راستای جریان ارائه نمودند. در این معادله پارامترهای موثر بر طراحی سنگچین بصورت ضرایب تصحیح معرفی شده است:

$$N_c = 2.85 K_y \cdot K_d \cdot K_B \cdot K_c \cdot K_u \quad (1)$$

که در آن N_c پارامتر بی‌بعد پایداری سنگچین می‌باشد. می‌توان بیشتر رابطه‌های تجربی ارائه شده برای طراحی اندازه سنگچین اطراف پایه پل را بر اساس این پارامتر و به صورت رابطه (2) بازنویسی نمود (Karimae and Zarrati, 2013).

$$N_c = \frac{\rho \cdot U^2}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad (2)$$

در این معادله d_{50} متوسط اندازه پایدار سنگچین، ρ و ρ_s به ترتیب چگالی سیال و چگالی دانه‌های سنگچین و U سرعت جریان در بالادست محل پایه پل می‌باشند. سایر پارامترهای معادله (1) شامل:

$$K_y = \left(\frac{y}{d_{50}}\right)^{0.25} \quad \text{ضریب تصحیح عمق جریان}$$

$$K_d = \left(\frac{B}{d_{50}}\right)^{-0.5} \quad \text{ضریب تصحیح اندازه سنگچین}$$

و ضریب اصلاح زاویه برخورد جریان به پایه پل

$$K_B = \left(\frac{B}{B_{eff}}\right)^{1.5} \quad \text{که } y \text{ عمق جریان و } B_{eff} \text{ عرض مؤثر پایه}$$

(تصویر پایه در راستای عمود بر جهت جریان) بوده (شکل 1) و بصورت رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$B_{eff} = L \cdot \sin \theta + B(1 - \sin \theta) \quad (3)$$

در این رابطه θ زاویه برخورد جریان به پایه پل می‌باشند.

قرارگیری پایه نسبت به راستای جریان و نسبت ابعادی پایه (L/B) می‌باشد که در آن L طول و B عرض پایه است (Karimae and Zarrati, 2013). طراحی گستره سنگچین در اطراف پایه پل با مقطع مستطیلی در دو حالت محافظت شده توسط طوق و بدون طوق، توسط مشاهیر و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است (Mashahir et al., 2010). در این تحقیق از سه پایه با نسبت ابعادی متفاوت استفاده شده که در زوایای مختلف نسبت به راستای جریان قرار داده شدند. آنها به این نتیجه رسیدند که بدون تأثیر نسبت ابعادی پایه، استفاده از طوق در تراز بستر می‌تواند وسعت لایه سنگچین در پایه پل مستقیم (بدون زاویه نسبت به راستای جریان) را تا میزان 35 درصد کاهش دهد، اما با افزایش زاویه قرارگیری پایه پل نسبت به راستای جریان، تأثیر طوق بر لایه سنگچین کاهش می‌یابد.

با وجود اینکه نیروهای وارد بر مصالح بستر در اطراف پایه پل، بصورت غیریکنواخت و نامساوی می‌باشند، اما در تمامی مطالعات گذشته سنگچین‌هایی با یک اندازه برای حفظ پایداری لایه سنگچین اطراف پایه پل بکار گرفته شده است. در صورتی که، برای کاهش هزینه، می‌توان در مناطقی که نیروی کوچکتری وارد می‌گردند از سنگچین‌هایی با اندازه کوچکتر استفاده نمود. این عمل بخصوص برای پایه پل مستطیلی با نسبت ابعادی بزرگ و تحت زاویه با راستای جریان، به علت وسعت زیاد لایه سنگچین در اطراف آن، دارای اهمیت می‌باشد. این موضوع اولین بار توسط کریمایی و همکاران معرفی شد (Karimae et al., 2015). در این تحقیق بعد از محاسبه اندازه سنگچین‌های پایدار با اندازه مختلف در اطراف پایه، محدوده قرارگیری آنها برای پایه مستطیل شکل پل با نسبت ابعادی 5 مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت الگوریتم طراحی برای طرح سنگچین با ابعاد مختلف ارائه شد. اما یکی از فاکتورهای مهم طراحی سنگچین نسبت ابعادی پایه است که در این مطالعه بررسی نشده است. هدف از مطالعه حاضر، طراحی گستره لایه سنگچین با ابعاد مختلف در اطراف پایه مستطیل شکل پل با نسبت ابعادی مختلف می‌باشد. بدین منظور، مطالعه بر روی این پایه‌ها تحت زوایای قرارگیری متفاوت نسبت به راستای جریان و در دو حالت محافظت

انتخاب شده است. آستانه حرکت ذرات بستر با استفاده از آزمایش‌هایی جداگانه به مدت 24 ساعت در شرایط بدون حضور پایه به دست آمد. در این شرایط اگر چه دانه‌های کوچکتر از d_{50} حرکت می‌کردند، ولی تغییرات کلی تراز بستر کمتر از 2 تا 3 میلی‌متر بود. برای محاسبه مقدار پارامتر u^* در شرایط آستانه حرکت ذرات بستر از اندازه‌گیری پروفیل سطح آب استفاده شده است. برای این منظور بعد از اندازه‌گیری مقدار عمق جریان با استفاده از ابزارهای آزمایشگاهی در دو مقطع از طول کانال که با فاصله معلوم از هم قرار دارند، مقداری برای ضریب شزی C در طول کانال فرض می‌شود. سپس فاصله بین دو مقطع به چندین قسمت مساوی تقسیم می‌شود. در نهایت با انجام روش گام به گام با معلوم بودن عمق پایاب، عمق بالادست محاسبه می‌شود، اگر مقدار عمق بالادست متفاوت بود ضریب شزی تغییر داده شده و دوباره مراحل کار تکرار می‌شود. پس از اتمام کار ضریب شزی کانال، عمق جریان، شیب خط انرژی و در نهایت پارامتر سرعت برشی u^* در محل پایه محاسبه می‌شود. همچنین برای محاسبه پارامتر u_{*c}^* که به صورت سرعت برشی در حالت آستانه حرکت دانه‌های بستر تعریف می‌شود، از نمودار شیلدز استفاده شده است. محاسبات نشان داد که در شرایط آستانه حرکت دانه‌های بستر مقدار پارامتر شدت جریان $(\frac{u_*^*}{u_{*c}^*})$ برابر با 0/92 بدست می‌باشد. در جدول 1 شرایط جریان و خصوصیات مصالح بستر در آزمایش‌های مطالعه حاضر بیان شده است.

برای انجام آزمایش‌ها از سه پایه پل با مقطع مستطیلی با دماغه‌ی گرد گوشه و از جنس پلکسی‌گلاس استفاده شده است. عرض پایه‌های پل یکسان و برابر 50 میلی‌متر و طول آنها متفاوت و برابر 150، 250 و 350 میلی‌متر می‌باشد. بنابراین نسبت ابعادی پایه‌های مذکور به ترتیب برابر 3، 5 و 7 می‌باشد. انتخاب عرض پایه به گونه‌ای بوده است که تأثیر جداره‌های کانال بر ساختار جریان دور پایه ناچیز باشد. طبق نظر رودکیوی و اتما، در این شرایط باید نسبت عرض کانال به قطر پایه بیشتر از 6/25 باشد (Raudkivi and Ettema, 1983). در تحقیق حاضر این مقدار در حدود 15 است.

لازم به ذکر است در شرایطی که پایه دایره‌ای باشد، $B_{eff}=B$ است. K_c ضریب اصلاح تأثیر قرارگیری طوق در تراز بستر است که مقدار آن برای حالتی که نسبت عرض طوق به عرض پایه 3 باشد و همچنین طوق در تراز بستر قرار بگیرد، بصورت رابطه (4) محاسبه می‌گردد (کریمائی و زرانی، 1393 و Karimaee et al., 2015).

$$K_c = \begin{cases} 1.6 \text{ for } \frac{B_{eff}}{B} < 1.7 \\ 1.0 \text{ for } \frac{B_{eff}}{B} \geq 1.7 \end{cases} \begin{cases} \text{پایه محافظت شده با طوق} \\ \text{پایه محافظت نشده} \end{cases} \rightarrow 1.0 \quad (4)$$

در نهایت ضریب اصلاح K_{II} ، تأثیر شرایط غیرماندگاری جریان بر پایداری سنگچین را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر از معادله (1) برای طراحی سنگچین استفاده شده است.

3- مواد و روش‌ها

فلومی که آزمایش‌ها در آن انجام گرفته است، بصورت مستقیم، افقی و به طول 10، عرض 0/74 و عمق 0/6 متر می‌باشد. این فلوم مجهز به دو پمپ با حداکثر دبی 75 لیتر بر ثانیه بوده و یک سرریز مستطیلی لبه تیز به همراه مانومتر برای سنجش دبی در پایین دست است. تنظیم عمق جریان با استفاده از یک دریچه که در انتهای کانال قرار دارد انجام می‌گیرد و برای سنجش عمق در کانال از یک عمق‌سنج با دقت 0/1 میلی‌متر استفاده می‌گردد. در این کانال در فاصله ای به اندازه 5 متر از بالادست یک ناحیه به طول 1/5 متر و عمق 0/2 متر پایین تر از تراز کف کانال وجود دارد که در آن رسوبات ریخته شده و پایه پل در آن قرار داده می‌شود. اندازه متوسط مصالح بستر (d_{50}) 0/95 میلی‌متر با ضریب انحراف هندسی کمتر از 1/3 می‌باشد. ضریب انحراف هندسی بصورت رابطه (5) تعریف می‌شود (Raudkivi, 1998):

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (5)$$

تمامی آزمایش‌ها در شرایط آستانه حرکت ذرات بستر انجام گرفته است. با توجه به ثابت بودن اندازه مصالح کف بستر در تمامی آزمایش‌ها، دبی و عمق جریان نیز ثابت

جدول 1 شرایط جریان و بستر در آزمایش‌ها

$d_{50}(mm)$	$Q(\frac{m^3}{s})$	$U(\frac{m}{s})$	$y(m)$	$u^*(\frac{m}{s})$	$u_c^*(\frac{m}{s})$	$\frac{u^*}{u_c^*}$
0/95	0/034	0/35	0/13	0/018	0/022	0/92

شد که این گستره کافی بوده و هیچ شکست لبه‌ای مشاهده نشد. همچنین برای جلوگیری از شکست غربالی ضخامت سنگچین به میزان $2/5$ برابر اندازه متوسط بزرگترین اندازه سنگچین موجود در گستره در نظر گرفته شد (Chiew, 1995). و در عمل نیز هیچ شکست غربالی مشاهده نشد. برای انجام آزمایش در هر یک از 24 حالت، در ابتدا با بررسی محدوده گستره سنگچین، منطقه‌ای که به نظر می‌رسید بیشینه نیروهای وارد بر بستر اطراف پایه در آنها وجود دارد، شناسایی گردید. طراحی سنگچین نیز از طریق رابطه (1) انجام شد که برای حداکثر نیروی وارد بر سنگچین بوده و نیروهای وارد از طرف جریان را تحمل می‌کرد (سنگ چین طراحی). ناحیه با حداکثر نیروی جریان به عنوان منطقه 1 نام‌گذاری شد و بقیه محدوده باقی‌مانده که تحت تأثیر نیروهای کوچکتری نسبت به منطقه 1 قرار دارند، به عنوان منطقه 2 در نظر گرفته شد. در نتیجه از سنگچین‌هایی با ابعاد کوچکتر از سنگچین طراحی (در منطقه 1) در منطقه 2 استفاده شد. همچنین در بعضی از موارد بخصوص برای پایه‌های تحت زاویه 20 درجه که گستره سنگچین بسیار وسیع بود، محدوده دیگری به نام منطقه 3 مشخص شد که در آن نیروهای وارده جریان کوچکتر از منطقه 2 می‌باشد.

برای شناسایی اندازه و محدوده سنگچین در هر یک از این مناطق، آزمایش‌های مختلفی به صورت سعی و خطا انجام گرفت. برای حصول اطمینان از پایداری گستره سنگچین، تمامی آزمایش‌ها به مدت 10 ساعت انجام شد. اگر در طول زمان آزمایش هیچکدام از سنگ‌دانه‌ها شسته نشود، لایه سنگچین مذکور به عنوان گستره پایدار در نظر گرفته می‌شد. بر این اساس، پس از قرار دادن سنگچین طراحی در منطقه (1)، اندازه سنگچین پایدار در مناطق 2 و 3 بصورت سعی و خطا بدست آمد. بدین صورت که برای شروع از کوچکترین اندازه‌های سنگچین در جدول 2 استفاده می‌شد و اگر در طول زمان انجام آزمایش سنگچین

برای انجام آزمایش‌ها مربوط به پایه پل محافظت شده با طوق از طوقی که نسبت عرض آن به عرض پایه برابر با 3 است، استفاده شد. علت استفاده از این طوق، تأثیر مناسب آن بر کاهش عمق آبشستگی و همچنین اجرائی بودن ابعاد آن در عمل، می‌باشد. همچنین ضخامت طوق مورد استفاده 1 میلی متر بوده و در تراز بستر نصب شده است. همچنین در آزمایش‌ها از 9 نوع سنگچین با ابعاد مختلف استفاده شده است. در جدول 2 علاوه بر مشخصات ابعادی سنگچین‌های مذکور، پارامتر پایداری سنگچین (N_c) نیز برای هر سنگچین با توجه به رابطه (2) و جدول 1 مشخص شده است. برای شروع آزمایش‌ها، ابتدا پایه پل با زاویه مشخص نسبت به راستای طولی کانال (راستای جریان) به نحوی که ابتدا و انتهای آن در فاصله یکسانی از جداره‌های کانال باشد، به کف فلوم توسط پیچ متصل شد. سپس بستر فلوم با مصالح ریزدانه پر شده و بعد از رسیدن به تراز مورد نظر، بستر کاملاً صاف گردید. در ادامه بعد از برداشتن لایه‌ای از خاک در اطراف پایه پل، سنگچین‌های مورد نظر در اطراف پایه ریخته شد. سپس درجه تنظیم عمق جریان بالا آورده شد و آب با دبی بسیار کم، به نحوی که مصالح بستر حرکتی نداشته باشند به داخل فلوم روانه گردید. بعد از اینکه عمق آب در داخل کانال به حد کافی بالا آورده شد، به آهستگی دبی کانال با باز کردن شیر فلکه افزایش داده شده و بعد از تنظیم دبی، عمق جریان با پایین آوردن درجه پایین‌دست، تنظیم گردید.

آزمایش‌ها بر روی هر کدام از 3 پایه مورد نظر در 2 حالت محافظت شده با طوق و بدون طوق انجام گرفته است. همچنین زاویه قرارگیری پایه‌ها نسبت به جهت جریان در 4 حالت مختلف و برابر با 0، 5، 10 و 20 درجه انتخاب شده است. بنابراین در مجموع 24 حالت آزمایش انجام گرفت. گستره لایه سنگچین در اطراف پایه پل در هر یک از 24 حالت مختلف آزمایش بر اساس پیشنهادات مشاهیر و همکاران (2010) طراحی شده است. در عمل مشاهده

4- تحلیل نتایج

4-1- گستره سنگچین با ابعاد مختلف در اطراف

پایه مستطیلی بدون استفاده از طوق

4-1-1- قرارگیری پایه در وضعیت مستقیم

ابتدا آزمایش‌ها برای پایه پل با نسبت ابعادی 5 و در وضعیت مستقیم (بدون زاویه نسبت به راستای جریان) صورت گرفت. پس از بررسی مشاهدات آزمایشگاهی و همچنین مراجع مختلف نظیر مشاهیر و همکاران (2010) مشخص شد که شکست لایه سنگچین در بالادست دماغه پایه و به علت اثرات جریان رو به پایین و تمرکز تنش برشی در آن منطقه اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب منطقه مذکور به عنوان منطقه 1 انتخاب و سایر مناطق گستره سنگچین به عنوان منطقه 2 در نظر گرفته شدند. سپس آزمایش‌های مختلف برای رسیدن به محدوده بهینه برای هر یک از این مناطق و همچنین اندازه سنگچین مناسب در این شرایط انجام گرفت. در نهایت بعد از انجام این آزمایش‌ها، محدوده گستره لایه سنگچین در هر منطقه با ابعاد مختلف سنگچین بدست آمد که در شکل 3- الف نشان داده شده است.

جدول 3 درصد مساحت مناطق مختلف نسبت به مساحت کل گستره سنگچین را نشان می‌دهد.

در منطقه‌ای ناپایدار می‌شد، در مرحله بعدی از سنگچین-هایی با ابعاد بزرگتر در آن منطقه استفاده گردیده و آزمایش دوباره انجام می‌گرفت. این کار تا جایی ادامه می‌یافت که در طول آزمایش، سنگچین‌های موجود در تمامی مناطق پایدار بمانند. همچنین در هر آزمایش شکل مناطق مختلف قرارگیری سنگچین نیز مورد بازنگری قرار می‌گرفت تا طرح بهینه برای گستره سنگچین با ابعاد مختلف در شرایط مورد نظر پایه بدست آید.

بررسی مراجع مختلف نشان می‌دهد که محققان مختلف معیارهاب پایداری متفاوتی را برای پایداری سنگچین در نظر گرفته‌اند. به عنوان نمونه طبق بررسی معیار مشاهیر و همکاران (2010) شکست لایه سنگچین زمانی بوجود می‌آید که اولین حرکت در دانه سنگچین اتفاق می‌افتد که معیاری محافظه‌کارانه است. از طرفی طبق معیار کریمایی و زراتی (2013) در صورتی شکست رخ می‌دهد که تعداد کمی دانه سنگچین (در حدود 10 تا 15 عدد) در زمان آزمایش حرکت کنند. طبق این معیار با توجه به اینکه دانه‌های سنگچین دارای انحراف معیار می‌باشد در نتیجه حرکت اولین دانه برای کوچکترین سنگدانه اتفاق می‌افتد که نمی‌تواند نماینده مناسبی برای کل لایه سنگچین باشد. بر این اساس در تحقیق حاضر از معیار کریمایی و زراتی (2013) برای شکست سنگچین استفاده شده است.

جدول 2 مشخصات ابعادی و عدد پایداری سنگچین‌ها

مشخصات سنگچین	اندازه متوسط ذره (mm)	B/d_{50}	SG	σ	N_c
سنگچین 1	2/19	22/83	2/65	1/21	3/79
سنگچین 2	3/56	14/10	2/65	1/26	2/33
سنگچین 3	4/65	10/75	2/65	1/2	1/79
سنگچین 4	5/74	8/71	2/65	1/18	1/45
سنگچین 5	6/52	7/67	2/65	1/18	1/27
سنگچین 6	7/12	7/02	2/65	1/2	1/17
سنگچین 7	8/00	6/25	2/65	1/27	1/03
سنگچین 8	10/35	4/83	2/65	1/25	0/80
سنگچین 9	12/7	3/94	2/65	1/25	1/65

نسبی سنگچین پایدار ((B/d_{50})) در منطقه 2 برابر با 22/83 می‌باشد که نسبت به سنگچین طراحی در منطقه 1 (با اندازه نسبی 14/1) به میزان 38% کوچکتر است. این موضوع می‌تواند به لحاظ مسائل اقتصادی حائز اهمیت باشد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در وضعیت مستقیم قرارگیری پایه با نسبت ابعادی مختلف، شکل گستره سنگچین با ابعاد متفاوت کاملاً مشابه می‌باشند (شکل 3-الف).

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، به عنوان مثال برای پایه با نسبت ابعادی 5، تنها حدود 8 درصد از وسعت گستره سنگچین، مربوط به منطقه 1 می‌باشد که سنگچین طراحی مطابق با رابطه (1) در آن قرار می‌گیرد و در مابقی گستره از سنگچین‌هایی با اندازه کوچکتر از سنگچین‌های منطقه 1 استفاده شده است. همچنین در جدول 4 اندازه سنگچین پایدار در مناطق مختلف گستره ارائه شده است. با توجه به این جدول برای شرایط پایه مستقیم، اندازه

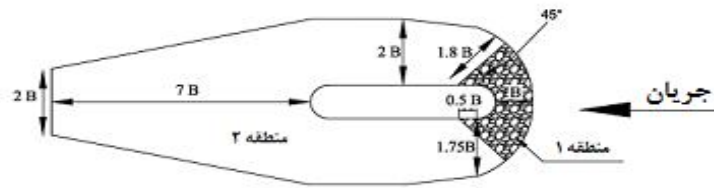
جدول 3 درصد مساحت مناطق مختلف گستره بهینه لایه سنگچین در حالت پایه بدون طوق

نسبت ابعادی	زاویه قرارگیری پایه نسبت به راستای جریان	درصد مساحت پوشیده با سنگچین		
		منطقه 1	منطقه 2	منطقه 3
پایه	به راستای جریان	9/6	90/4	---
مستقیم (صفر درجه)	3	9/6	90/4	---
	5	8	92	---
	7	6/9	93/1	---
5°	3	10/3	89/7	---
	5	8/8	91/2	---
	7	15/6	84/4	---
10°	3	21/1	78/9	---
	5	23	77	---
	7	22/9	77/1	---
20°	3	22/2	29/2	48/6
	5	27/8	24/6	47/6
	7	21/2	14/5	64/3

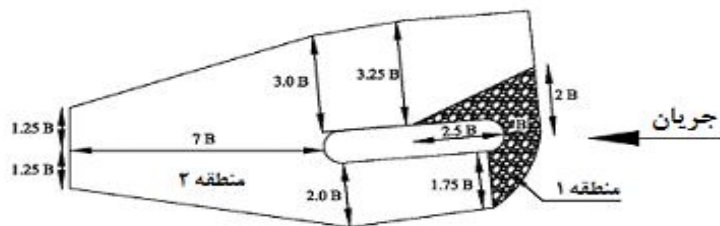
جدول 4 ابعاد سنگچین پایدار در مناطق مختلف گستره بهینه سنگچین در حالت پایه بدون طوق بر حسب میلی‌متر

شماره آزمایش	نسبت ابعادی پایه پل	زاویه قرارگیری	اندازه سنگچین در منطقه 1	اندازه سنگچین در منطقه 2	اندازه سنگچین در منطقه 3
1	3	0	3/56	2/19	----
2	3	5	3/56	2/19	----
3	3	10	4/65	2/19	----
4	3	20	5/74	4/65	2/19
9	5	0	3/56	2/19	----
10	5	5	4/65	2/19	----
11	5	10	5/74	2/19	----
12	5	20	8/00	6/52	3/56
17	7	0	3/56	2/19	----
18	7	5	4/65	2/19	----
19	7	10	7/12	3/56	----
20	7	20	12/7	10/35	6/52

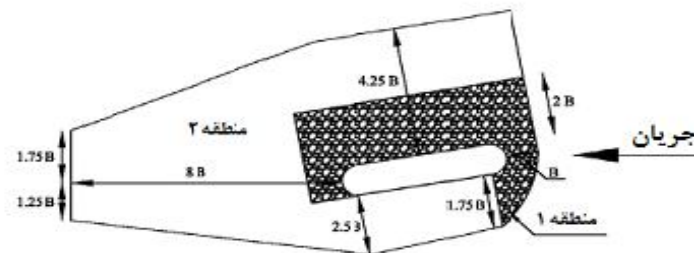
(الف)



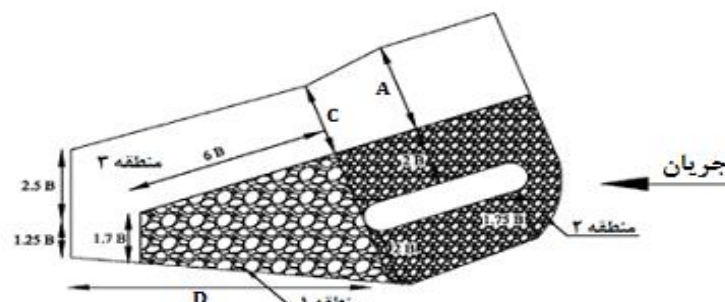
(ب)



(ج)



(د)



شکل 3 گستره بهینه سنگچین با ابعاد مختلف در اطراف پایه پل بدون طوق (الف) در وضعیت مستقیم (ب) تحت زاویه 5 درجه، (ج) تحت زاویه 10 درجه و (د) تحت زاویه 20 درجه، نسبت به راستای جریان

جریان قرار می‌گیرد، گرداب‌های برخاستگی قوی‌تر، همراه با کاهش فشار بیشتر در پایین‌دست پایه پل، بخصوص در نقطه جدایش جریان مشاهده می‌گردد، بطوری که اثرات

2-1-4- قرار گیری پایه در وضعیت زاویه‌دار نسبت به جریان بطور کلی زمانی که پایه پل تحت زاویه نسبت به راستای

مطابق با شکل (3-د) طراحی شد که با توجه به وسعت زیاد آن به سه منطقه مجزا تقسیم شده است. منطقه 1 در پشت پایه، منطقه 2 در مجاورت پایه و منطقه 3 در اطراف مناطق 1 و 2 قرار دارند. از طرفی طبق یافته‌های مشاهیر و همکاران (2010)، با افزایش نسبت ابعادی پایه، محدوده گستره سنگچین در حالت پایه 20 درجه افزایش می‌یابد (جدول 5). در نتیجه به جز وسعت منطقه 1 که برای پایه‌های مختلف یکسان است، وسعت مناطق 2 و 3 با افزایش نسبت ابعادی پایه، افزایش می‌یابد. در جدول 3 مساحت مناطق مختلف در گستره سنگچین اطراف پایه 20 درجه با نسبت ابعادی مختلف ارائه شده است. به عنوان نمونه برای پایه با نسبت ابعادی 5، گستره سنگچین شامل 27/8% منطقه 1 با سنگچین طراحی و به ترتیب 24/6% و 47/6% مربوط به مناطق 2 و 3 با سنگچین‌هایی کوچکتر می‌باشند (جدول 3). همچنین با توجه به جدول 4 برای پایه‌ها با نسبت ابعادی مختلف، اندازه سنگچین پایدار در مناطق 2 و 3، به ترتیب به میزان حدوداً 20% و 55% کمتر از سنگچین پایدار در منطقه 1 است که با توجه به رابطه (1) بدست می‌آید.

جدول 5 ابعاد گستره سنگچین در شکل (3-د).

نسبت ابعادی پایه	A	C	D
3	2/5B	2/5B	8/5B
5	3B	2/5B	8/5B
7	4B	4/5B	13B

توجه: A، C، D ابعاد مختلف گستره سنگچین می‌باشد (شکل 3-د)

4-2-2- گستره سنگچین با ابعاد مختلف در اطراف

پایه مستطیلی محافظت شده با طوق

4-2-1- قرارگیری پایه در وضعیت مستقیم

در این حالت با انجام آزمایش‌ها بر روی هر 3 پایه مشاهده گردید، منطقه بیشینه نیروهای وارد بر بستر که در حالت بدون طوق در نزدیکی دماغه پایه بود، بخوبی با استفاده از طوق محافظت گردیده است. به این ترتیب با در نظر گرفتن شکل 3- الف، طوق منطقه 1 گستره سنگچین را پوشانده است و کفایت در منطقه 2 از سنگچین‌های شماره 1 در جدول 2 استفاده شود که به میزان 38% کوچکتر از سنگچین طراحی در حالت بدون طوق هستند.

آن با افزایش نسبت ابعادی پایه افزایش می‌یابد. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که در شرایط پایه‌های مختلف با زاویه 5 درجه نسبت به راستای جریان، شکست لایه سنگچین در ناحیه جدایش و در پایین دست دماغه پایه پل اتفاق می‌افتد. بر این اساس محدوده گستره سنگچین به دو منطقه یکی در ناحیه جدایش و در پایین دست دماغه پایه به عنوان منطقه 1 و دیگری در اطراف آن به عنوان منطقه 2 تقسیم شد. در نهایت پس از انجام آزمایش‌ها مختلف، گستره نهایی لایه سنگچین مطابق با شکل 3- ب بدست آمد. در این گستره مطابق با جدول 3 بطور میانگین تنها در حدود 12 درصد از مساحت لایه سنگچین در منطقه 1 و مابقی مربوط به منطقه 2 می‌باشد. نکته مهم اینکه شکل این گستره برای پایه‌ها با نسبت ابعادی مختلف ثابت است، ولی با توجه به افزایش شدت گرداب‌های برخاستگی، به علت افزایش نسبت ابعادی پایه در توافق با معادله طراحی ابعاد پایدار سنگچین، یعنی رابطه (1)، باید از سنگچین‌های با اندازه بزرگتری برای نسبت‌های ابعادی بیشتر در منطقه 1 استفاده شود (جدول 2). همچنین با توجه به جدول 4 مشخص می‌گردد که در این حالت، ابعاد سنگچین در منطقه 2 برای پایه‌ها با نسبت ابعادی مختلف حدوداً به میزان 45% کوچکتر از اندازه سنگچین در منطقه 1 است. در حالت پایه‌ها با نسبت ابعادی مختلف که تحت زاویه 10 درجه نسبت به راستای جریان قرار گرفته‌اند، پس از بررسی‌های مختلف، گستره سنگچین به دو منطقه، یکی در کناره پایه و در ناحیه جدایش به عنوان منطقه 1 و دیگری در اطراف آن، به عنوان منطقه 2 تقسیم شد (شکل 3- ج). بر اساس جدول 3 منطقه 1 بطور متوسط تنها حدوداً 22 درصد از مساحت لایه سنگچین را پوشش می‌دهد و مابقی مربوط به منطقه 2 است.

همچنین مطابق با جدول 4، در منطقه 2 از سنگچین‌هایی با ابعاد حدوداً 55% کوچکتر از منطقه 1 استفاده شده است. در نهایت با قرار دادن پایه‌های پل تحت زاویه 20 درجه نسبت به راستای جریان، به علت بوجود آمدن مکش زیاد منطقه زیادی در مجاورت و پشت پایه تحت تأثیر نیروهای مخرب جریان قرار گرفت. پس از انجام آزمایش‌های مختلف گستره لایه سنگچین با ابعاد مختلف

پایه پل که در ناحیه جدایش جریان قرار دارد، انجام می‌گیرد. مطابق با شکل (4-ج) منطقه مذکور به عنوان منطقه 1 انتخاب گردید که تنها بخشی از آن توسط طوق محافظت می‌شود و بخش دیگر باید با سنگچین محافظت شود. از طرفی سایر نواحی گستره که در اطراف طوق و منطقه 1 قرار دارند، به عنوان منطقه 2 انتخاب شد. با توجه به نتایج جدول 6 ابعاد سنگچین مورد استفاده در منطقه 2 در حدود 45% اندازه سنگچین مورد استفاده در منطقه 1 است که با استفاده از رابطه (1) بدست آمده است. جدول 7، درصد مساحت پوشیده شده توسط سنگچین‌های با ابعاد مختلف را در حالت پایه محافظت شده با طوق نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول به عنوان مثال برای حالت پایه با نسبت ابعادی 7 تحت زاویه 10 درجه نسبت به راستای جریان مساحت منطقه 1 حدوداً 14/1 درصد از کل مساحت گستره لایه سنگچین می‌باشد. نکته مهم دیگر اینکه مساحت محدوده کلی گستره سنگچین در این حالت حدوداً 13 درصد کمتر از حالت بدون طوق است.

در نهایت، پایه‌ها تحت زاویه 20 درجه نسبت به جریان قرار داده شدند که پس از انجام آزمایش‌های متعدد گستره بهینه سنگچین مطابق با شکل 4-د طراحی شد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، گستره سنگچین در این حالت، به دو منطقه تقسیم‌بندی گردید که در آن مساحت مناطق 1 و 2 با توجه به نسبت ابعادی پایه تغییر می‌کند. علت این موضوع مطابق نتایج تحقیق مشاهیر و همکاران (2010) می‌باشد که اشاره می‌کنند، در این حالت مشابه با حالت پایه بدون طوق، محدوده لایه سنگچین با افزایش نسبت ابعادی پایه پل گسترش می‌یابد.

در جدول 8 مقادیر پارامترهای مجهول در گستره لایه سنگچین بهینه مربوط به پایه 20 درجه با نسبت ابعادی مختلف نشان داده شده است. همچنین با توجه به نتایج جدول 7 مشخص می‌گردد که برای حالت پایه با نسبت ابعادی 3، منطقه 1 در حدود 34/1 درصد از کل مساحت ناحیه گستره را شامل می‌شود و مابقی مربوط به منطقه 2 است که ابعاد سنگچین پایدار در آن حدوداً به میزان 55%

با استفاده از رابطه (1) نیز سنگچین طراحی در حالت وجود طوق محاسبه گردید که با نتایج آزمایش‌ها همخوانی داشت. به این ترتیب گستره سنگچین در این حالت تنها دارای یک منطقه در نظر گرفته شد که سنگچین طراحی در آن قرار می‌گیرد و در شکل 4-الف نشان داده شده است. کریمایی و همکاران (2015) نیز به نتایج مشابهی برای پایه با نسبت ابعادی 5 دست یافتند. نکته مهم دیگر اینکه مساحت محدوده کلی گستره سنگچین در این حالت حدوداً 25 درصد کمتر از حالت بدون طوق است.

4-2-2- قرارگیری پایه در وضعیت زاویه‌دار نسبت به جریان

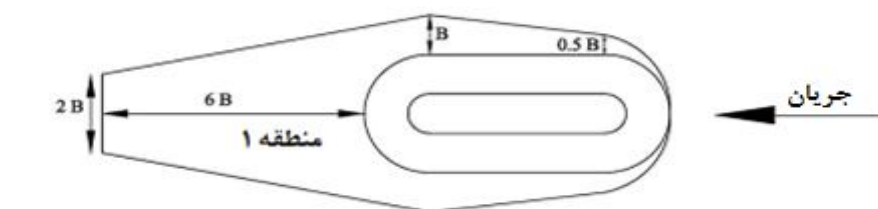
بطور کلی با افزایش زاویه قرارگیری پایه، از میزان اثر بخشی طوق برای حفاظت از بستر دور پایه کاسته و حجم لایه سنگچین مورد نیاز تقریباً مشابه با حالت پایه بدون طوق می‌گردد (Karimae et al., 2015). در حالتی که پایه، بصورت مورب و تحت زاویه 5 درجه نسبت به راستای جریان قرار داده شد، برای هر 3 پایه منطقه بیشینه نیروهای وارد بر بستر در کناره و پایین دست پایه پل قرار داشت که مشابه با حالت پایه مستقیم به خوبی با طوق محافظت می‌شود. بر این اساس، گستره لایه سنگچین با ابعاد مختلف تنها دارای یک منطقه (یک اندازه سنگچین) است که در شکل 4-ب نشان داده شده است و سنگچین طراحی در آن قرار می‌گیرد. در جدول 6 ابعاد سنگچین پایدار در اطراف پایه پل، با توجه به نسبت ابعادی پایه ارائه شده است. با توجه به داده‌های ارائه شده در این جدول، در پایه‌های با نسبت ابعادی 3، 5 و 7 به ترتیب از سنگچین‌های شماره 1، 2 و 2 (جدول 2) برای حفظ پایداری در این منطقه استفاده شده است. همچنین مقایسه مساحت محدوده گستره سنگچین در این شرایط نسبت به حالت بدون طوق نشان می‌دهد که این مقدار در حدود 18 درصد کمتر از حالت بدون طوق است.

در ادامه مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در حالت پایه 10 درجه نسبت به راستای جریان، شکست لایه سنگچین در هر 3 پایه با نسبت ابعادی مختلف مشابه و در کناره

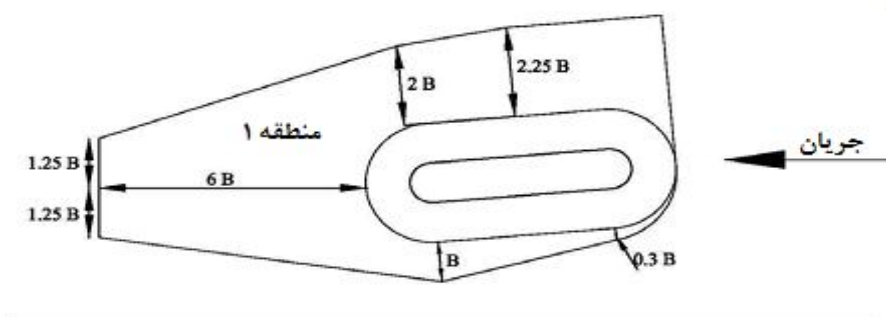
این حالت در حدود 12 درصد کمتر از حالت بدون طوق است.

کمتر از سنگچین طراحی در منطقه 1 هستند (جدول 6). نکته آخر اینکه مساحت محدوده کلی گستره سنگچین در

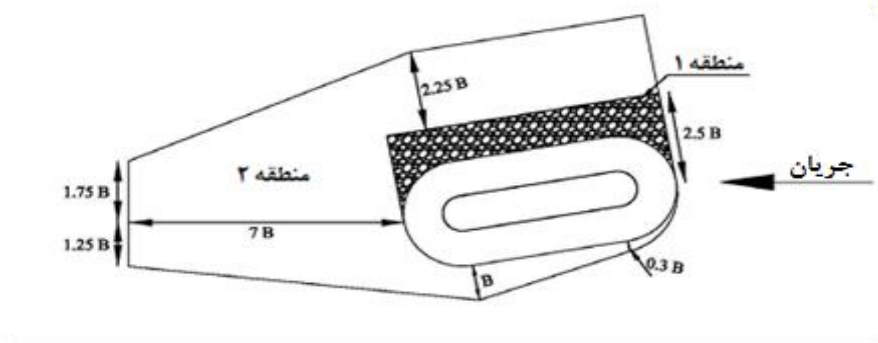
(الف)



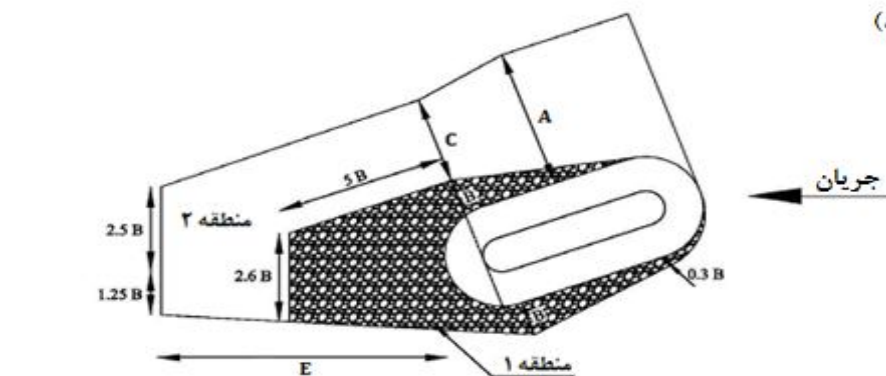
(ب)



(ج)



(د)



شکل 4 گستره بهینه سنگچین در اطراف پایه پل محافظت شده توسط طوق : الف) پایه مستقیم ب) پایه تحت زاویه 5 درجه، ج) پایه تحت زاویه 10 درجه و د) پایه تحت زاویه 20 درجه نسبت به راستای جریان

جدول 6 ابعاد سنگچین پایدار در مناطق مختلف گستره بهینه سنگچین در حالت پایه با طوق بر حسب میلی متر

شماره آزمایش	نسبت ابعادی		اندازه سنگچین	
	پایه پل	زاویه قرار گیری (درجه)	در منطقه 1 (mm)	در منطقه 2 (mm)
1	3	0	2/19	----
2	3	5	2/19	----
3	3	10	3/56	2/19
4	3	20	5/74	2/19
5	5	0	2/19	----
6	5	5	3/56	----
7	5	10	4/65	2/19
8	5	20	8/00	3/56
9	7	0	2/19	----
10	7	5	3/56	----
11	7	10	6/52	3/56
12	7	20	12/7	5/74

جدول 7 درصد مساحت مناطق مختلف گستره بهینه لایه سنگچین در حالت پایه با طوق

زاویه قرار گیری پایه نسبت به راستای جریان	نسبت ابعادی پایه	درصد مساحت پوشیده با سنگچین	
		منطقه 1	منطقه 2
مستقیم (صفر درجه) 5°	۳،۵،۷	1	---
	۳،۵،۷	1	---
10°	3	11/2	88/8
	5	13/1	86/9
	7	14/1	85/9
20°	3	35/8	64/2
	5	34/1	65/9
	7	21/2	78/8

شرایط پایه پل، گستره سنگچین با ابعاد مختلف با استفاده از شکل‌های 3 و 4 بدست می‌آید. در ادامه طراحی اندازه سنگچین در منطقه 1 که در آن پایه پل تحت بزرگترین نیروها از طرف جریان قرار دارد، از طریق رابطه (1) انجام می‌گیرد (سنگچین طراحی). در نهایت برای محاسبه اندازه سنگچین در مناطق دیگر، اندازه سنگچین طراحی در منطقه 1 در ضرایب کاهش ضرب می‌گردد. در تحقیق حاضر برای محاسبه مقدار این ضرایب کاهش، از نتایج نزدیک به 60 سری آزمایش انجام شده که در جدول‌های 4 و 6 ارائه شده‌اند، استفاده می‌گردد. در واقع در این جدول‌ها، با توجه شرایط پایه، از تقسیم مقدار سنگچین پایدار در هر منطقه به سنگچین طراحی در منطقه 1،

جدول 8 ابعاد گستره بهینه سنگچین در شکل (4-د).

نسبت ابعادی پایه	A	C	E
3	3/5B	2/5B	7/5B
5	4B	2/5B	7/5B
7	5B	4/5B	12B

توجه: A، C و E ابعاد مختلف گستره سنگچین می‌باشد (شکل 4-د)

4-3- طراحی گستره سنگچین با ابعاد مختلف

در ابتدا باید مشخص کرد که برای حفاظت از بستر اطراف پایه پل در مقابل آبشستگی، آیا فقط از سنگچین استفاده شود و یا از ترکیب سنگچین و طوق؟ به طور کلی محدوده گستره سنگچین در اطراف پایه پل محافظت شده با طوق کمتر از حالت پایه بدون طوق است. سپس با توجه به

نیروهای وارده از طرف جریان در نواحی مختلف از گستره سنگچین اطراف پایه متفاوت است، از سنگچین با ابعاد کوچکتر در مناطقی که نیروهای کوچکتری وارد می‌گردد استفاده شد. بنابراین آزمایش‌های متعددی برای طراحی گستره با ابعاد مختلف در اطراف پایه پل صورت گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سنگچین پایدار که با استفاده از روابط طراحی بدست می‌آید، تنها در مساحت کوچکی از کل گستره سنگچین مورد نیاز می‌باشد. بطور مثال برای پایه با نسبت ابعادی 5، در وضعیت 10 درجه نسبت به راستای جریان و بدون استفاده از طوق، تنها لازم است در 23 درصد از مساحت کل گستره سنگچین از سنگچین طراحی استفاده کرد و در سایر قسمت‌ها از سنگچین با اندازه 0/45 برابر اندازه سنگچین طراحی استفاده نمود. در همین شرایط در صورت وجود طوق، لازم است سنگچین طراحی تنها در 12 درصد از مساحت گستره سنگچین ریخته شود و در بقیه مناطق از سنگچین با اندازه 0/55 برابر اندازه سنگچین طراحی استفاده نمود. در نهایت بر اساس نتایج آزمایش‌ها، ضرایب طراحی مناسب برای طراحی اندازه سنگچین در نقاط مختلف گستره حفاظت ارائه گردید.

6- فهرست علائم

B	عرض پایه پل
B_{eff}	عرض مؤثر پایه
C	ضریب شری
d_{50}	اندازه متوسط دانه‌های بستر و یا سنگچین
K_b	ضریب اصلاح زاویه برخورد جریان به پایه پل
K_c	ضریب تصحیح تأثیر طوق
K_d	ضریب تصحیح اندازه سنگچین
K_u	ضریب اصلاح تأثیر شرایط غیر ماندگاری جریان
K_y	ضریب تصحیح عمق
L	طول پایه پل
N_c	پارامتر بی‌بعد اندازه پایدار سنگچین
U	سرعت جریان در بالادست محل پایه پل
u^*	پارامتر سرعت برشی جریان
u^*_{*c}	سرعت برشی آستانه حرکت دانه‌های بستر
W	عرض طوق
y	عمق جریان

مقدار ضریب کاهشی مربوط به آن منطقه بدست می‌آید. نتایج نشان داد که مقدار ضرایب کاهشی بدست آمده، تنها تابعی از زاویه قرارگیری پایه بوده و ارتباط کمی با نسبت ابعادی پایه دارند. بر این اساس در جدول 9 مقادیر ضرایب کاهشی در هر منطقه از گستره بهینه سنگچین ارائه شده است.

جدول 9 ضرایب طراحی سنگچین‌ها در مناطق مختلف

پایه پل	زاویه قرار گیری	ضریب طراحی		
		منطقه 1	منطقه 2	منطقه 3
بدون طوق	مستقیم	1	0/62	---
	5 درجه	1	0/55	---
	10 درجه	1	0/45	---
	20 درجه	1	0/8	0/45
محافظت شده	مستقیم	1	---	---
	5 درجه	1	---	---
	10 درجه	1	0/55	---
	20 درجه	1	0/45	---

5- نتیجه گیری

یکی از راه‌کارهای کاهش هزینه اجرای سنگچین در اطراف پایه پل، استفاده از ابعاد مختلف سنگ در محدوده گستره سنگچین می‌باشد. علت این موضوع این است که بخش زیادی از محدوده گستره سنگچین تحت تأثیر نیروهای کمتری از نیروی طراحی اندازه سنگچین (حداکثر نیروی ناشی از جریان) است. به این ترتیب می‌توان در مناطقی که نیروهای کوچکتری وجود دارند، از سنگچین‌هایی با اندازه کوچکتر استفاده نمود. این عمل، بخصوص برای پایه پل مستطیلی با نسبت ابعادی بزرگ و تحت زاویه با راستای جریان، به علت وسعت زیاد لایه سنگچین در اطراف آن، دارای اهمیت است. بر این اساس در مطالعه حاضر، طراحی گستره سنگچین با ابعاد مختلف در اطراف پایه پل با مقطع مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور گستره لایه سنگچین در اطراف پایه پل با مقطع مستطیلی تحت زوایای قرارگیری مختلف نسبت به راستای جریان و در دو حالت محافظت شده با طوق و بدون طوق مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. در این آزمایش‌ها از 3 پایه پل با نسبت ابعادی (نسبت طول به عرض) 3، 5 و 7 استفاده گردید. به علت اینکه شدت

125(12), pp. 1302-1305.

Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Zevenbergen, L. W., and Girard, L. G. (2007). "Countermeasures to protect bridge piers from scour." NCHRP Report 593, TRB, NAS, Washington D. C., 272p. www.trb.org.

Mashahir, M. B., Zarrati, A. R. and Mokallaf, E., (2010), "Application of riprap and collar to prevent scouring around piers rectangular bridge", J. Hydraul. Eng., 136(3), pp. 183-187.

Melville, B. W. and Raudkivi, A. (1977). "Flow characteristics in local scour at bridge piers." J. Hydraul. Res., 15(4), pp. 373-380.

Melville, B.W. and Hadfield, A.C. (1999). "Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures." J. Hydraul. Engrg., 125(11), pp. 1221-1224.

Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1987). "Scour prevention at bridge piers." Proc., Nat. Conf. Hydraul. Engrg., ASCE, Williamsburg, Va., pp. 5253-5257.

Raudkivi, A. and Ettema, R. (1983). "Clear water scour at cylindrical piers." J. Hydraul. Engrg. 109(3), pp. 338-350.

Richardson, E. V. and Davis, S. R. (2001). "Evaluating scour at bridges." Hydraul. Eng. Circular, No. 18 (HEC-18 Fourth Edition), FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Raudkivi, A. J. (1998). *Loose boundary hydraulics*, Balkema, Rotterdam. The Netherlands.

Tafarjnoruz, A., Gaudio, R. and Calomino, F., (2012). "Bridge pier scour mitigation under steady and unsteady flow conditions", ActaGeophysica, 60(4), pp. 1076-1097.

Zarrati, A. R., Gholami, H. and Mashahir, M. B. (2004). "Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers", J. Hydraul. Res., 42(1), pp. 97-103.

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." J. Hydraul. Eng., 132(2), pp. 154-162.

Zarrati, A. R., Chamani, M. R., Shafaei, A. and Latifi, M. (2010). "Scour countermeasures for cylindrical bridge piers using riprap and combination of collar and riprap", I. J. Sed. Res., 25(3), p. 31

θ

زاویه برخورد جریان به پایه پل

ρ

چگالی سیال

ρ_s

چگالی دانه‌های سنگچین

σ_g

ضریب انحراف هندسی

7- منابع

کریمایی طبرستانی، م. و زرّاتی، ا. ر. (1393)، "تأثیر طوق و شرایط غیرماندگاری جریان بر پایداری سنگچین در اطراف پایه‌های پل"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی پل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

Chiew, Y. M. (1992). "Scour protection at bridge piers." J. Hydraul. Eng., 118(9), pp. 1260-1269.

Chiew, Y. M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge pier." J. Hydraul. Eng., 121(9), pp. 635-643.

Froehlich, D. C., (2013), "Protecting bridge piers with loose rock riprap", J. Applied Water Eng. and Res., 1(1), pp. 39-57.

Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A.H. (2009). "Countermeasures against local scouring at bridge piers: Slot and combined system of slot and bed sill." J. Hydraul. Eng. 135(5), pp. 425-431.

Karimae Tabarestani, M. and Zarrati A. R. (2011), "Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge piers." Int. J. Eng., Transactions C, 25(1), pp. 11-16.

Karimae Tabarestani, M. and Zarrati A. R., (2013), "Design of stable riprap around aligned and skewed rectangular bridge piers", J. Hydraul. Eng., 139(8), pp. 911-916.

Karimae Tabarestani, M., Zarrati A. R., Mashahir M. B. and Mokallaf, E., (2015), "Extent of riprap layer with different stone sizes around rectangular bridge piers with or without an attached collar", Scientia Iranica, 22(3), pp. 709-716.

Karimae Tabarestani M. and Zarrati A. R. (2015), "Design of riprap stone around bridge pier using empirical and Neural Network Method", Civil Engineering Infrastructures Journal, 48(1), pp. 175-188.

Kumar, V., RangaRaju, K. G., and Vittal, N. (1999). "Reduction of local scour around bridge piers using slot and collar." J. Hydraul. Eng.,