

تحلیل قابلیت اطمینان سنگچین طراحی در اطراف پایه پل در شرایط همبستگی بین فراسنجه‌های هیدرولیکی

مجتبی کریمائی طبرستانی^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۲۹)

چکیده

یکی از روش‌های کاربردی و متداول در کنترل آبستگي موضعی قرار دادن لایه سنگچین در اطراف سازه‌های هیدرولیکی به‌خصوص پایه پل‌ها است. با توجه به نبود قطعیت‌های مختلف در برآورد اندازه پایدار سنگچین، در تحقیق حاضر از روش تحلیل قابلیت اطمینان برای طراحی سنگچین در اطراف پایه یک پل واقعی به‌عنوان مطالعه موردی استفاده می‌شود. بر این اساس از چهار روش مختلف نظیر تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه اول و شبیه‌سازی مونت‌کارلو اقدام به کمی کردن عدم قطعیت‌ها و طراحی اندازه سنگچین پایدار می‌شود. نتایج تحلیل حاضر نشان داد که احتمال شکست اندازه سنگچینی که از طریق روش قطعی و به‌کارگیری مقدار میانگین فراسنجه‌های مؤثر برای طراحی محاسبه شد، بسیار بالا بوده و نزدیک به ۳۴ درصد است. در ادامه رابطه‌ای بین ضریب ایمنی طراحی و ضریب قابلیت اطمینان در محل این مطالعه موردی تعیین شد. درنهایت برای نیل به شرایط واقعی تر، اقدام به مطالعه ضریب همبستگی هیدرولیکی بین فراسنجه‌های عمق و سرعت جریان و همچنین تأثیر آن بر احتمال شکست سنگچین در محل مطالعه موردی شد و نتایج نشان داد که ضریب همبستگی بین این دو فراسنجه هیدرولیکی بسیار بالا بوده و بیشتر از ۹۰ درصد است و حداکثر تأثیر آن بر احتمال شکست کمتر از ۱۰ درصد است.

واژه‌های کلیدی: آبستگي، پایه پل، سنگچین، قابلیت اطمینان مرتبه اول، ضریب همبستگی

۱. گروه مهندسی ژئوتکنیک و آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، لویزان، تهران، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: karimaei@sru.ac.ir

مقدمه

که در آن N_c فراسنجه بی‌بعد پایداری سنگچین بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

در این رابطه 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 هستند.

در رابطه (۱) ضریب λ ضریب اصلاح مدل رگرسیون است. این ضریب در تحلیل قطعی بر کل داده‌های آزمایشگاهی پوش شده و مقدار آن برابر با $2/85$ ارائه شد. برای تحلیل پایداری سنگچین در شرایط احتمالاتی نیاز است توزیع فراسنجه‌ها منظور شود. نتایج تحقیق کریمایی و زراتی (۱۰) نشان می‌دهد که می‌توان یک توزیع نرمال با مقدار متوسط و انحراف از معیار برابر با $3/8$ و $0/1$ را بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داد.

سایر فراسنجه‌های رابطه (۱) شامل ضریب تصحیح عمق جریان $K_y = (y/d_{50})^{0.25}$ ضریب تصحیح اندازه سنگچین $K_d = (B/d_{50})^{-0.5}$ و ضریب اصلاح زاویه برخورد جریان به پایه پل $K_b = (B_{eff}/B)^{-1.5}$ ، که در آن y عمق جریان، B عرض پایه مستطیلی و B_{eff} عرض مؤثر پایه (تصویر پایه در راستای عمود بر جهت جریان) بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

در این رابطه L طول پایه و θ زاویه برخورد جریان به پایه مستطیلی هستند. لازم به ذکر است در شرایطی که پایه دایره‌ای باشد، $B_{eff} = B$ است. در بعضی از طرح‌ها استفاده از دیوار هدایت برای پایه‌های مستطیلی شکل که می‌تواند پایه را در راستای جریان قرار دهد توصیه می‌شود تا ضمن مستقیم کردن جریان ورودی به محل پایه، قدرت فرسایشی آن کاهش یابد. (شکل ۱).

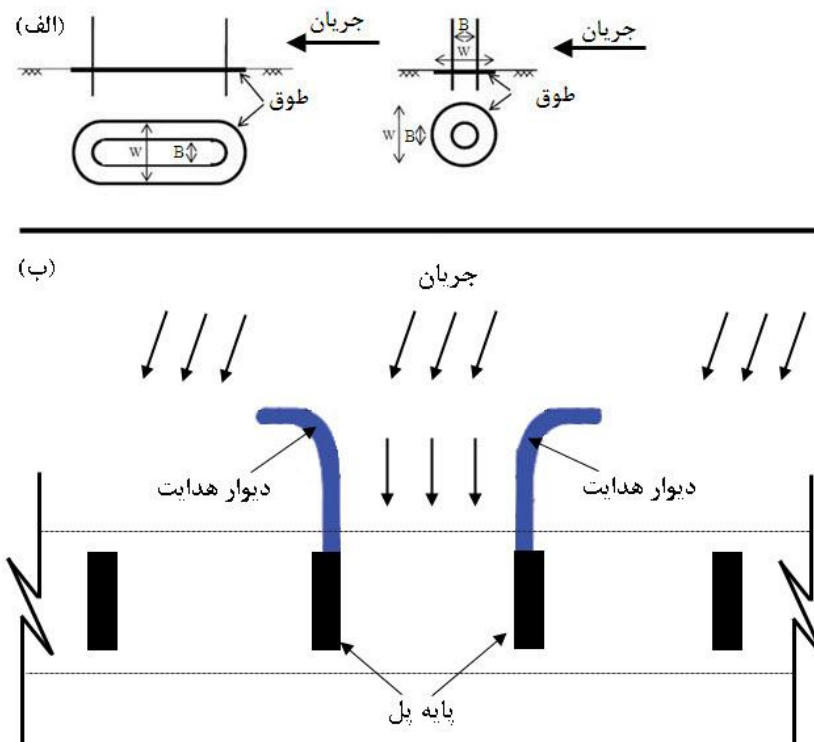
در ادامه K_c ضریب اصلاح تأثیر قرارگیری طوق در تراز بستر است. طوق صفحه نازکی است که برای جلوگیری از

پدیده آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل‌ها و ستون‌ها در محیط‌های رودخانه‌ای و یا دریایی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تخریب این سازه‌ها شناخته می‌شود. علت این اتفاق تغییر شدید الگوی جریان در پیرامون سازه است. مطالعات نشان می‌دهد که الگوی جریان در اطراف پایه پل شامل جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی در جلوی پایه و گرداب برخاستگی در اطراف و پشت پایه هستند. در شرایطی که پایه تحت زاویه با راستای جریان باشد، به علت گستردگی ناحیه جدایش جریان در اطراف پایه، قدرت ساختارها افزایش می‌یابد و نتیجه آن افزایش عمق و گستردگی حفره آبشستگی می‌شود.

موضوع آبشستگی و روش‌های کنترل آن از دیرباز مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. تفرج‌نوروز و همکاران (۲۳) روش‌های کنترل فرسایش در اطراف پایه پل را با توجه به محل نصب تجهیزات کنترل آبشستگی در چهار قسمت مختلف: الف) متصل به بستر در اطراف پایه نظیر سنگچین، ب) بازشدگی در داخل پایه، ج) متصل به دور پایه نظیر طوق و د) انواع متفاوت دیگر تقسیم می‌کنند.

در میان راهکارهای متنوع پیشنهاد شده برای بالا بردن مقاومت بستر، استفاده از سنگچین به‌عنوان یکی از معمول‌ترین روش‌های کنترل و کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل مطرح است. طراحی لایه سنگچین شامل انتخاب اندازه پایدار سنگچین، طراحی گستره و ضخامت مناسب لایه سنگچین است (۱ و ۸). در زمینه تعیین اندازه پایدار و گستره سنگچین اطراف پایه پل با مقطع دایره‌ای مطالعات زیادی انجام گرفته است (۱، ۱۳ و ۱۴). کریمایی و زراتی (۸)، کریمایی و همکاران (۹) و رشنو و همکاران (۲۰) پس از انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی مختلف رابطه‌ای تجربی برای طراحی اندازه دانه‌های سنگچین در اطراف پایه‌های پل با مقطع دایره‌ای و یا مستطیلی به صورت مستقیم و یا تحت زاویه با راستای جریان ارائه کردند. این رابطه عبارت است از:

$$N_c = \lambda \times K_y \times K_d \times K_b \times K_c \times K_u \times K_g \quad (1)$$



شکل ۱. ترکیب سنگچین با سازه‌های کنترل آبستگي مختلف: الف) طوق و ب) دیوار هدایت

تأثیری بر اندازه پایدار سنگچین نخواهد داشت و در نتیجه مقدار فراسنجه K_c همانند حالت بدون طوق برابر با یک خواهد بود. همچنین فراسنجه K_{II} به عنوان فراسنجه‌ای که تأثیر شرایط غیرماندگاری جریان اعمالی را بر شکست سنگچین مدل می‌کند، معرفی شده است به گونه‌ای که برای شرایط نقطه اوج هیدروگراف سیل، مقدار ضریب K_{II} در رابطه (۱) برابر با $K_{II}=1$ است (۲۰). در نهایت فراسنجه K_g تأثیر استفاده از گروه پایه پل به جای یک تک پایه را نشان می‌دهد. بر این اساس با توجه به اثر حفاظتی پایه جلویی بر پایه‌های پشتی می‌توان مطابق با رابطه (۵) اندازه سنگ در اطراف پایه‌های پشتی نسبت به پایه جلویی را کاهش داد:

$$K_g = \begin{cases} 1 & 1^{st} \text{ pier} \\ 1.086 \times (G/B)^{-0.225} \times (B/d_{50})^{0.259} \times (y/B)^{-0.035} & 2^{nd} \text{ pier} \\ 0.982 \times (G/B)^{-0.176} \times (B/d_{50})^{0.345} \times (y/B)^{-0.049} & 3^{rd} \text{ pier} \end{cases} \quad (5)$$

همان‌گونه که در این رابطه مشخص است اثر گروه پایه بر

اثرهای جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی در اطراف پایه پل نصب می‌شود (شکل ۱). کارایی طوق تابعی از ابعاد و تراز قرارگیری آن نسبت به تراز بستر است. مطالعات نشان می‌دهد که بهترین و اقتصادی‌ترین شرایط برای حالتی است که اندازه طوق ۳ برابر عرض پایه و تراز قرارگیری آن در تراز بستر باشد (۹). در این شرایط مقدار این ضریب عبارت است از:

$$K_c = \begin{cases} \text{With Collar} \begin{cases} 1.6 & B_{eff}/B < 1.7 \\ 1.0 & B_{eff}/B \geq 1.7 \end{cases} \\ \text{Without Collar} \rightarrow 1 \end{cases} \quad (4)$$

در واقع در شرایطی که $B_{eff}/B < 1.7$ وجود طوق می‌تواند فراسنجه N_c را در رابطه (۱) نسبت به حالت پایه بدون طوق به میزان ۶۰ درصد افزایش دهد. با توجه به تعریف فراسنجه N_c در رابطه (۲)، این مقدار افزایش به معنی کاهش اندازه پایدار سنگچین به میزان ۴۰ درصد خواهد بود که می‌تواند به اقتصاد یک پروژه کمک زیادی کند. ولی در شرایطی که $B_{eff}/B \geq 1/7$ باشد به علت دور شدن ناحیه بحرانی شکست سنگچین از مجاورت پایه و پیشروی آن به سمت پایین دست، وجود طوق

این رهیافت جدید مسیر طراحی‌ها در مهندسی آینده باشد و به مرور جایگزین روش‌های قطعی کلاسیک موجود در آیین‌نامه‌های فعلی شود. در علم هیدرولیک این موضوع اهمیت دوچندان دارد چرا که ماهیت بارهای اعمالی بر سازه نظیر سیلاب و باد و یا پدیده‌های مؤثر بر عملکرد سازه نظیر حمل رسوب بسیار غیر قطعی هستند و در صورت طراحی سازه بر اساس معیارهای روش‌های قطعی (استفاده از ضریب اطمینان)، این امکان وجود دارد که به طرحی با ایمنی بیش از حد بالا و یا پایین دست یافت. به این ترتیب ارائه رهیافت‌های جدید در علوم مهندسی برای اعمال عدم قطعیت‌ها در طراحی‌ها اجتناب ناپذیر است. تلاشی که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و نتیجه این تلاش‌ها ارائه روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان و ریسک-پایه است که مبنای آنها به کارگیری علم احتمالات در طراحی است. در مسائل مهندسی هیدرولیک عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها و تئوری‌ها، هم در مرحله تحلیل و هم طراحی، منجر به لزوم استفاده از روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان که اساس آنها کمی کردن عدم قطعیت‌های موجود در طراحی سازه‌ها است (۱۸)، می‌شود. شکست در سازه هیدرولیکی از جمله خرابی پل‌ها در مسیر جریان رودخانه نتیجه تأثیرهای متقابل اتفاقی بودن بار خارجی و عدم قطعیت‌های مختلف در تحلیل، طراحی، ساخت و به کارگیری سازه است.

جانسون و داک (۵) یک روش احتمالاتی برای تعیین عمق آبشستگی با استفاده از رابطه تجربی HEC-18 (۱) ارائه کردند. آنها در تحقیق خود اثر عمق قرارگیری پی و همچنین عمر مفید سازه را بر قابلیت اطمینان پایداری یک نمونه پل واقعی مورد بررسی قرار دادند. موزامیل و همکاران (۱۷) یک مدل احتمالاتی بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان و ارزیابی ریسک برای محاسبه عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل ارائه کردند. در این تحقیق که اثر غیریکنواختی دانه‌های رسوب نیز در نظر گرفته شده است از روش قابلیت اطمینان مرتبه اول First Order Reliability Method (FORM) استفاده شد. همچنین

اندازه سنگچین تابعی از فاصله بین مرکز تا مرکز پایه‌ها (G) است. به این ترتیب با توجه به مقدار فراسنجه K_g ، اندازه لازم برای سنگ در اطراف هر پایه در گروه پایه قابل محاسبه خواهد بود.

در مطالعه حاضر از رابطه (۱) برای تحلیل پایداری سنگچین در اطراف پایه پل بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. به جای این رابطه، می‌توان از هر رابطه دیگری در مراجع استفاده کرد.

طراحی گستره سنگچین در اطراف پایه پل با مقطع مستطیلی در دو حالت محافظت شده توسط طوق و بدون طوق، توسط مشاهیر و همکاران (۱۶) مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که این روش حفاظت از آبشستگی در صورتی که سنگ در دسترس باشد و اندازه سنگ‌ها و محدوده پوشش سنگ‌چین کافی و مناسب طرح شده باشد، روشی بسیار اقتصادی و مقرون به صرفه است (۱). با توجه به پیچیدگی‌های حاکم بر پدیده شکست سنگچین در اطراف پایه‌های پل، مطالعات در زمینه پایداری سنگچین و ارائه روش‌های طراحی مناسب بیشتر آزمایشگاهی و با استفاده از مدل‌های فیزیکی انجام شده است.

در شرایط آب زلال در صورتی که ضخامت و گستره مناسب برای سنگچین انتخاب شود، تنها عامل مهم در پایداری سنگچین، تعیین اندازه مناسب است تا لایه سنگچین دچار شکست برشی ناشی از نیروهای جریان بر دانه‌های سنگ‌چین نشود (۸).

به تازگی موضوع پایداری و احتمال شکست سازه‌های مهندسی با توجه به ماهیت غیرقطعی بارهای اعمالی به سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای در جامعه علمی برخوردار شده است. موضوعی که در تحلیل‌های قطعی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد و مهندسان با اعمال یک ضریب اطمینان در طراحی سعی در اعمال اثرهای عدم قطعیت در طراحی سازه دارند. به این ترتیب در طراحی به روش قطعی، اطلاعاتی در مورد میزان پایداری و ایمنی سازه‌ها در دسترس نخواهد بود. به نظر می‌رسد

شکست را کاهش داد. کریمایی (۱۲) اقدام به مطالعه بر پایداری سنگچین در اطراف پایه پل موجود در آبراهه اصلی و دشت سیلابی با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان کرد. این پژوهشگر بدون در نظر گرفتن اثر همبستگی بین فراسنجه‌ها و در شرایط استقلال بین آنها نتیجه گرفت که فراسنجه سرعت جریان در آبراهه بیشترین تأثیر را بر تغییر قابلیت اطمینان اندازه سنگچین دارد. وو و لو (۲۴) قابلیت اطمینان پی پل‌ها را در بلندمدت ناشی از پدیده آبخستگی مورد بررسی قرار دادند. ایشان اثر این پدیده را روی نشست و همچنین ظرفیت باربری پل مطالعه کردند. همچنین برای اعمال اثر تغییر مکانی فراسنجه‌های مقاومتی خاک از روش MCST استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که وجود آبخستگی در طول عمر یک پل موجب افزایش احتمال شکست آن ناشی از افزایش نشست و یا کاهش ظرفیت باربری می‌شود. مطالعات دیگری (۶، ۱۹، ۲۲ و ۲۵) نیز در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان پدیده آبخستگی موضعی در اطراف پایه پل ارائه شده است.

بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که کمبودها و نواقص متعددی در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان پدیده آبخستگی و به خصوص عملکرد سازه‌های محافظ در برابر آبخستگی نظیر سنگچین وجود دارد. بر این اساس در تحقیق حاضر اقدام به بررسی پایداری لایه سنگچین محافظ در اطراف پایه یک پل واقعی (بلک‌مونت نیوزیلند) با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان می‌شود. در این راستا از روش‌های First Order Second Moment (FOSM)، FORM و MCST استفاده می‌شود. همچنین ارتباط بین شاخص اعتمادپذیری و ضریب اطمینان در روش قطعی نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در نهایت با محاسبه ضرایب همبستگی بین فراسنجه‌های هیدرولیکی، تأثیر این ضرایب روی قابلیت اطمینان پایداری سنگچین مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

روش‌های انجام تحلیل قابلیت اطمینان

در مطالعه حاضر، شکست حالت حدی یا مرز بین ناحیه ایمن و

این پژوهشگران با انجام تحلیل حساسیت نشان دادند که در بین فراسنجه‌های مختلف مؤثر بر عمق آبخستگی، عدد فرود جریان بیشترین تأثیر را روی مقدار عمق آبخستگی و همچنین سطح ایمنی پایه پل دارد. سلامتیان و همکاران (۲۱) نیز یک مدل احتمالاتی برای محاسبه سطح ایمنی پل‌ها ناشی از پدیده آبخستگی ارائه کردند. در این تحقیق اثر همزمان پایه و کوله در نظر گرفته شد و از روش شبکه بیزین برای محاسبه ریسک شکست و یا بالعکس سطح ایمنی پل استفاده شد. برای همکاران (۲) در تحقیق خود به مطالعه احتمالاتی و ریسک شکست پل ناشی از آبخستگی پرداختند. تحلیل آماری این پژوهشگران روی شکست پل‌های موجود در آمریکا نشان می‌دهد که احتمال شکست سالیانه یک پل ناشی از آبخستگی برابر با $0/000044$ است. ایشان با بررسی دقت رابطه تعیین عمق آبخستگی HEC-18 (۱) نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی و پذیرش ریسک قابل قبول، ضریب اطمینان لازم را برای طراحی عمق کارگذاری پی ارائه کردند. کریمایی و زرانی (۱۰) اقدام به ارائه یک روش احتمالاتی برای محاسبه اندازه سنگچین پایدار در اطراف پایه پل کردند. در این تحقیق که از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو Monte Carlo Simulation Technique (MCST) استفاده شد اقدام به مطالعه اثر عمر مفید سازه و احتمال شکست قابل قبول روی اندازه سنگچین پایدار شد. کریمایی و همکاران (۱۱) در روش احتمالاتی خود برای طراحی سنگچین اثر مکانیزم‌های مختلف شکست سنگچین شامل شکست برشی، شکست لبه‌ای و شکست زیرشویی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از روش احتمالاتی درخت خطا برای تعیین احتمال شکست پل به‌عنوان یک سیستم (احتمال شکست سیستم) استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با لحاظ کردن مکانیزم‌های مختلف شکست سنگچین، ضریب قابلیت اطمینان و احتمال شکست پایه پل نسبت به حالت لحاظ کردن هر یک از مکانیزم‌ها به تنهایی تغییر زیادی می‌کند مگر اینکه با انتخاب اندازه‌های مناسب برای فراسنجه‌های مختلف سنگچین، تأثیر همزمان مکانیزم‌های

که سهم بزرگی در پیشرفت این موضوع و ارائه روش‌های بهتر دارد. این روش تنها از گشتاور استاتیکی دوم (میانگین و واریانس) مربوط به فراسنجه‌های احتمالاتی استفاده می‌کند (۱۸). در این روش تحلیل قابلیت اطمینان بر مبنای برآورد فراسنجه شاخص قابلیت اطمینان β انجام می‌گیرد. با توجه به مقدار میانگین و واریانس تابع عملکرد شاخص β به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (9)$$

که در آن فراسنجه‌های μ_z و σ_z با استفاده از بسط سری تیلور تابع عملکرد حول مقدار میانگین به دست می‌آیند. در نهایت احتمال شکست یا احتمال فراگذشت از حالت حدی با توجه به توزیع نرمال استاندارد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (10)$$

که در آن P_f احتمال شکست و $\Phi()$ تابع تجمعی توزیع نرمال استاندارد است.

روش FORM

در این روش فراسنجه β که به صورت حداقل فاصله از مبدأ مختصات تا سطح شکست در فضای نرمال استاندارد تعریف می‌شود، از طریق یک مسئله بهینه‌سازی با قید محدودیت برای فراسنجه‌های مستقل نسبت به هم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Minimize } \beta(z) = (X'^T X')^{1/2} \quad (11)$$

$$\text{Subject to } g(X') = 0$$

که در آن $g(X')$ تابع حالت حدی در فضای نرمال استاندارد است. همچنین X' بردار فراسنجه‌های تصادفی پایه در فضای نرمال استاندارد (فراسنجه تصادفی کاهش یافته) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X' = (X - \mu) / \sigma \quad (12)$$

که در آن X' فراسنجه نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار یک است. X نیز فراسنجه تصادفی در فضای

ناایمن در فضای فراسنجه‌های مؤثر بر طراحی به صورت بیشتر شدن اندازه پایدار سنگ لازم با توجه به شرایط بارهای ورودی نسبت به اندازه سنگ طراحی تعریف می‌شود. در نتیجه احتمال شکست تابع حالت حدی مربوط به مسئله طراحی اندازه سنگچین به صورت زیر تعریف می‌شود (۴):

$$P_f = P[g(X) \leq 0] \quad (6)$$

که در آن $g(X)$ تابع حالت حدی سنگچین و X بردار فراسنجه های تصادفی پایه مربوط به فراسنجه‌های مؤثر بر طراحی سنگچین است. بر این اساس، در صورتی که d_{50s} اندازه سنگچین مورد نیاز با توجه به بارهای ورودی (تقاضای سیستم) و d_{50R} اندازه سنگ موجود طراحی شده (ظرفیت سیستم) باشند، تابع حالت حدی سنگچین را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$g(X) = d_{50R} - d_{50S} \quad (7)$$

همان گونه که از این رابطه مشخص است شکست لایه سنگچین و در ادامه شکست پایه پل زمانی اتفاق می‌افتد که d_{50S} بزرگ‌تر یا مساوی d_{50R} باشد که مقدار تابع $g(X)$ صفر و یا منفی شود. در تحقیق حاضر از رابطه (۱) برای تعیین اندازه سنگچین مورد نیاز d_{50s} استفاده می‌شود. بر این اساس می‌توان رابطه (۷) را به صورت زیر نوشت:

$$g(X) = d_{50R} - \lambda^{-0.8} \times \left(\frac{P_s}{\rho} - 1 \right)^{-0.8} \times U^{1.6} \times g^{-0.8} \times y^{-0.2} \times B^{-0.8} \times [B \times (1 - \sin \theta) + L \times \sin \theta]^{1.2} \times K_c^{-0.8} \times K_g^{-0.8} \quad (8)$$

با داشتن تابع حالت حدی، مرحله بعدی تحلیل قابلیت اطمینان اندازه پایدار لایه سنگچین است. در تحقیق حاضر از چهار روش مختلف برای تحلیل قابلیت اطمینان یا احتمال شکست سنگچین به قرار زیر استفاده می‌شود.

روش FOSM

این روش یکی از اولین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان بود

احتمال تجمعی معکوس مربوط به فراسنجه‌های استاندارد نرمال، $F(x)$ تابع CDF غیرنرمال اصلی، $f_1[x]$ تابع PDF فراسنجه نرمال استاندارد و $f(x)$ تابع PDF غیرنرمال اصلی است. اگر فرض شود که $n_i = (x_i - \mu_i) / \sigma_i$ ، رابطه (۱۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{[n^T][R]^{-1}[n]} \quad (17)$$

در نهایت شاخص β را می‌توان در یک مسئله بهینه‌سازی محدود شده با استفاده از رابطه (۱۷) و با شرط $g(x) = 0$ در سالور اکسل محاسبه کرد. این کار با تغییر مقادیر n_i انجام می‌گیرد.

روش MCST

روش MCST به صورت برآورد نمونه‌های مختلفی از فراسنجه‌های تصادفی پایه با توجه به ویژگی‌های احتمالاتی هر یک و قرار دادن این نمونه‌ها در تابع حالت حدی انجام می‌گیرد. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد شکست هنگامی رخ می‌دهد که $g(X) < 0$ (رابطه ۸) باشد، در نتیجه یک برآورد از احتمال شکست P_f می‌تواند به صورت زیر تعریف شود (۴):

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (19)$$

که در آن N_f شمار چرخه‌های شبیه‌سازی است که $g(X) < 0$ و N شمار کل چرخه‌های شبیه‌سازی است. اگر N به سمت بی‌نهایت میل کند، P_f به سمت احتمال شکست واقعی میل خواهد کرد. پیشنهاد می‌شود که برای کاربردی کردن موضوع، شمار چرخه شبیه‌سازی به گونه‌ای انتخاب شود که ضریب تغییرات (COV) Coefficient of Variation (نسبت انحراف معیار به میانگین) احتمال شکست کوچک‌تر از ۵ درصد باشد (۴).

تأثیر اعمال ضریب همبستگی

ضریب همبستگی شاخصی است ریاضی که جهت و مقدار رابطه بین دو فراسنجه را توصیف می‌کند. بین دو فراسنجه همبستگی وجود دارد در صورتی که مقادیر دو فراسنجه شبیه

معمولی با میانگین μ و انحراف از معیار σ است. حل مسئله بهینه‌سازی بالا به صورت سعی و خطا انجام می‌گیرد که امکان دارد در بعضی از مواقع همگرایی به پاسخ بهینه نینجامد. پس از محاسبه شاخص β با استفاده از رابطه (۱۰) اقدام به محاسبه احتمال شکست می‌شود.

روش Spread sheet

لو و تانگ (۱۵) یک روش بهینه‌سازی با استفاده از توابع و اصول به‌کار رفته در صفحه نرم‌افزار اکسل ارائه کردند که در آن بدون نیاز به محاسبات مربوط به میانگین‌ها و انحراف از معیار نرمال معادل اقدام به محاسبه ضریب قابلیت اطمینان در روش FORM می‌کند. با توجه به رابطه (۱۱) در صورتی که همبستگی بین فراسنجه‌های احتمالاتی مؤثر موجود باشد، فرمول ماتریسی محاسبه ضریب قابلیت اطمینان β به صورت زیر خواهد بود:

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{(X - \mu)^T C^{-1} (X - \mu)} \quad (13)$$

یا به عبارت دیگر:

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{\left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^T \cdot R^{-1} \cdot \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)} \quad (14)$$

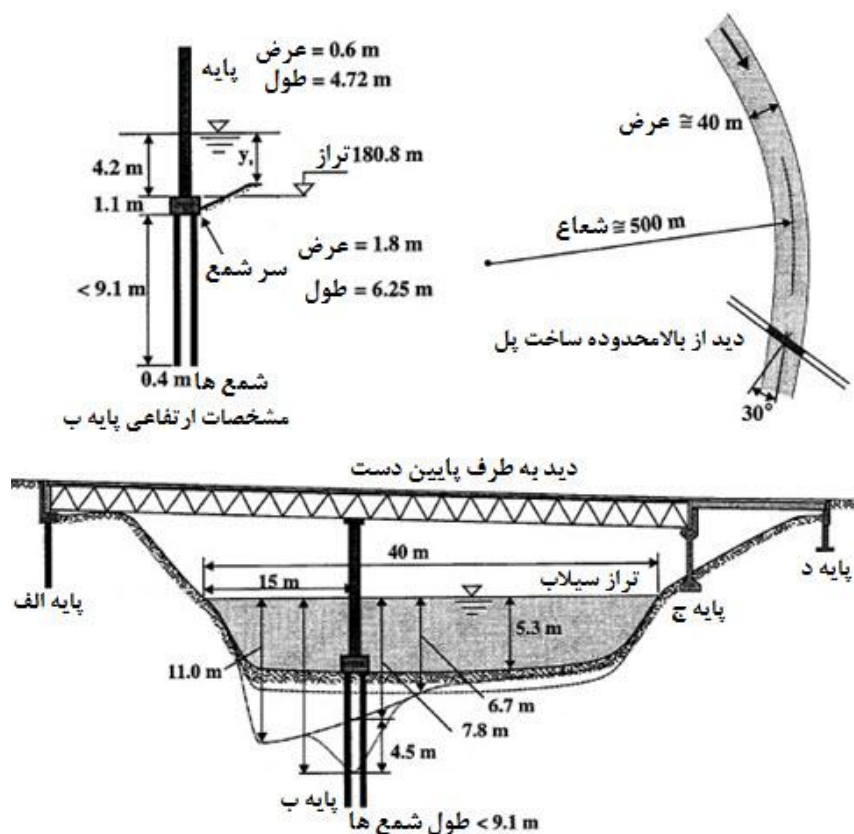
که در آن x_i فراسنجه احتمالاتی i ام از بردار فراسنجه تصادفی X با میانگین μ_i و انحراف از معیار σ_i است. همچنین C ماتریس کوواریانس، R ماتریس همبستگی و F نشان‌دهنده ناحیه شکست است. در رابطه (۱۴) باید از فراسنجه‌های نرمال استفاده شود. برای فراسنجه‌های غیرنرمال، مقادیر میانگین و انحراف از معیار نرمال معادل به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که احتمال تجمعی و چگالی احتمال توزیع نرمال معادل و توزیع غیرنرمال مشابه باشند. در این حالت مقدار میانگین نرمال معادل عبارت است از:

$$\mu^N = x - \sigma^N \phi^{-1} [F(x)] \quad (15)$$

و مقدار انحراف از معیار معادل عبارت است از:

$$\sigma^N = f_1 \left[\phi^{-1} [F(x)] \right] / f(x) \quad (16)$$

که در آن x فراسنجه غیرنرمال اصلی، $\phi^{-1} []$ تابع چگالی



شکل ۲. تصویر نمادین از پل بلک مونت به همراه داده‌ها و اندازه‌های لازم برای طراحی سنگچین (۳)

رابطه معکوس کامل بین دو فراسنجه را نشان می‌دهد. رابطه معکوس یا منفی نشان می‌دهد که اگر یک فراسنجه افزایش یابد، فراسنجه دیگر کاهش می‌یابد و بالعکس. همچنین زمانی که ضریب همبستگی برابر صفر است نشان می‌دهد که بین دو فراسنجه رابطه خطی وجود ندارد.

مطالعه موردی - پایه پل بلک مونت در نیوزیلند

برای نشان دادن کاربرد روش قابلیت اطمینان در مسائل واقعی، تحلیل قابلیت اطمینان لایه سنگچین برای پل بلک مونت نیوزیلند مورد بررسی قرار می‌گیرد. علت انتخاب این پل وجود داده‌های طراحی سنگچین شامل اطلاعات جریان و پایه پل در مقالات مختلف است (۳ و ۱۷). این پل که روی رودخانه ماراروا در کشور نیوزیلند ساخته شده بود به علت آبشستگی ناشی از عبور سیلابی با اوج ۹۰۰ مترمکعب بر ثانیه و زمان تداوم ۶ ساعت در سال ۱۹۸۰ فرو ریخت. شکل ۲ تصویری

هم تغییر کند یعنی با کم یا زیاد شدن یکی دیگری هم کم یا زیاد شود به گونه‌ای که بتوان ارتباط بین آنها را به صورت یک رابطه ریاضی بیان کرد. روش‌های مختلفی برای تعیین ضریب همبستگی وجود دارد که معروف‌ترین آنها ضریب همبستگی پیرسون است. این شاخص بی‌بعد بوده و برای دو فراسنجه هیدرولیکی سرعت و عمق جریان به صورت زیر تعریف می‌شود (۴):

$$\rho_{U,y} = \frac{E((U - E(U))(y - E(y)))}{[\text{Var}(U) \cdot \text{Var}(y)]^{1/2}} \quad (19)$$

در این رابطه $E()$ و $\text{Var}()$ به ترتیب واریانس و امید ریاضی فراسنجه مؤثر هستند. ضریب همبستگی پیرسون $(\rho_{U,y})$ عددی بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند. عدد ۱ بیانگر رابطه مستقیم کامل بین دو فراسنجه است. رابطه مستقیم یا مثبت به این معناست که اگر یکی از فراسنجه‌ها افزایش (کاهش) یابد، دیگری نیز افزایش (کاهش) می‌یابد. عدد -۱ نیز وجود یک

جدول ۱. محدوده داده‌های مؤثر بر اندازه سنگچین محافظ در اطراف پایه پل مربوط به پل بلک مونت نیوزیلند

ردیف	فراسنجه	نوع توزیع	مرجع	μ	COV
۱	ρ_w (Kg/m ³)	یکنواخت	فرض شده	۱۰۰۲/۵	۰/۰۰۴۳
۲	ρ_s (Kg/m ³)	یکنواخت	فرض شده	۲۷۰۰	۰/۰۲۲
۳	y (m)	نرمال	(۴)	۷/۸	۰/۲۳
۴	U (m/s)	نرمال	(۱۷)	۲/۸۸	۰/۳۲۹
۵	B (m)	نرمال	(۱۷)	۰/۶	۰/۰۵
۶	L (m)	نرمال	فرض شده	۴/۷۲	۰/۰۵
۷	θ (°)	نرمال	(۱۰)	۳۰	۰/۰۵
۸	λ	نرمال	(۱۰)	۳/۸	۰/۱
۹	d _{50R} (m)	نرمال	فرض شده	۰/۸۰۱	۰/۱

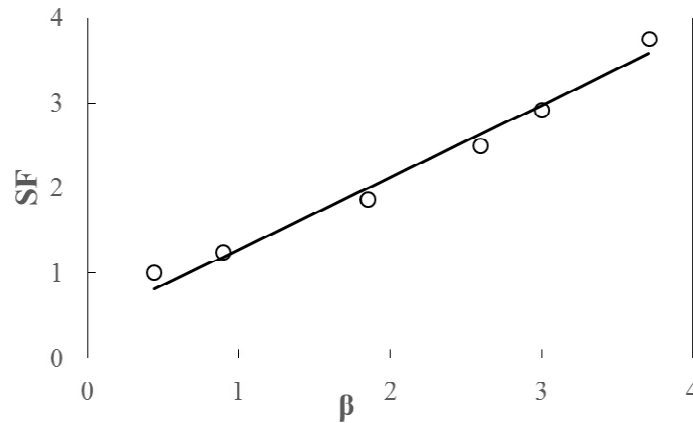
همچنین مقدار ضریب برازش پوش $\lambda = ۲/۸۵$ و نیز استفاده از رابطه (۱) نشان می‌دهد که اندازه پایدار سنگ برابر با $۰/۸۰۱$ متر به دست می‌آید. که البته مقدار بزرگی است. در نتیجه می‌توان پیشنهاد کرد که از سازه‌های محافظ دیگر نظیر طوق استفاده کرد. نکته مهم اینکه با توجه به اینکه فراسنجه K_b در محل پایه این پل برابر با $۴/۴۳$ است مقدار فراسنجه K_c در رابطه (۱) برابر با یک به دست می‌آید در نتیجه استفاده از طوق تأثیری بر کاهش اندازه سنگچین پایدار ندارد. برای حل این مشکل می‌توان از سازه دیوار هدایت (شکل ۳) برای مستقیم کردن جریان استفاده کرد در این حالت با مستقیم شدن جریان ورودی به محل پایه پل مقدار فراسنجه $\theta = ۰$ و فراسنجه $K_b = ۱$ می‌شود که در نتیجه آن $K_c = ۱/۶$ به دست می‌آید و در این حالت اندازه پایدار سنگ برابر با $۰/۰۹۲$ متر به دست می‌آید که بسیار کمتر از مقدار قبلی است. در واقع در شرایط استفاده از طوق و دیوار هدایت اندازه پایدار سنگچین به میزان ۹۰ درصد کاهش می‌یابد که این موضوع می‌تواند کمک زیادی به اقتصاد پروژه کند ولی اضافه هزینه ناشی از ساخت دیوار هدایت و طوق در این حالت باید در نظر گرفته شود. به طور کلی در این شرایط باید یک تحلیل اقتصادی و اجرایی انجام گیرد تا مشخص شود کدام روش در محل اجرای پروژه مناسب‌تر است.

نمادین از این پل را به همراه اطلاعات مختلف پایه و عمق آبستگي نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است پل در محل یک خم رودخانه ساخته شده است که این موضوع موجب تشدید اثرات جریان‌های چرخشی و زاویه برخورد جریان بر پتانسیل انتقال رسوب در محل پل می‌شود. اخبار غیررسمی در مورد این پل نشان می‌دهد که به علت مشکلات اجرایی، عمق قرارگیری شمع‌ها کمتر از میزان لازم محاسبه شده که برابر با $۹/۱$ متر است، ساخته شد و همین عامل موجب تخریب پل شد (۳). با توجه به این مشکلات اجرایی در محل ساختگاه این پل، استفاده از سنگچین می‌توانست به عنوان یک راهکار محافظت از این پل مطرح باشد. بر این اساس در تحقیق حاضر طراحی سنگچین در اطراف پایه‌های این پل مورد توجه قرار می‌گیرد. البته لازم به ذکر است که روش ارائه شده در این تحقیق برای هر پل دیگری که در مرحله طراحی قرار دارد قابل کاربرد است. جدول ۱ فراسنجه‌های مؤثر به همراه توزیع آنها را برای این پل نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

طراحی قطعی اندازه سنگچین در محل پل

نتایج محاسبه اندازه سنگچین در حالت قطعی با توجه به مقادیر میانگین فراسنجه‌های مؤثر ارائه شده در جدول ۱ و



شکل ۳. دقت رابطه (۱۹) در ارتباط بین ضریب ایمنی و ضریب قابلیت اطمینان

جدول ۲. نتایج تحلیل قابلیت اطمینان سنگچین با روش‌های مختلف

با استفاده از طوق و دیوار هدایت		بدون استفاده از طوق و دیوار هدایت		روش تحلیل قابلیت اطمینان	ردیف
P_f	β	P_f	β		
۰/۴۲۹	۰/۱۸۰	۰/۳۶۵	۰/۳۴۵	FOSM	۱
۰/۳۲۸	۰/۴۴۶	۰/۳۲۹	۰/۴۴۳	FORM	۲
۰/۳۲۸	۰/۴۴۶	۰/۳۲۹	۰/۴۴۳	Spread Sheet	۳
۰/۳۳۴	۰/۴۳۰	۰/۳۳۴	۰/۴۳۰	MCST	۴

بیان شد در صورتی که شمار چرخه‌های شبیه‌سازی در روش MCST کافی باشد این روش نتایج دقیق را به دست می‌دهد و می‌توان از آن برای بررسی دقت روش‌های دیگر استفاده کرد در حالی که روش FORM یک روش تقریبی است که از تقریب مرتبه اول بسط تیلور استفاده می‌کند. از سویی دیگر روش FORM یک روش سریع است و حجم محاسبات به مراتب کمتری نسبت به روش MCST دارد. روش Spread Sheet نیز یک راه حل جایگزین برای الگوریتم حل روش FORM است که مسیر حل به مراتب ساده‌تری دارد. در نهایت روش FOSM یک روش تقریبی است که تنها از اطلاعات ممان دوم و تقریب مرتبه اول تابع حالت حدی استفاده می‌کند. توصیه می‌شود که از این روش اخیر تنها برای شروع کار تحلیل قابلیت اطمینان استفاده شود. توضیحات فوق به خوبی در نتایج ارائه شده در جدول ۲ که برای شرایط عدم وابستگی بین فراسنجه‌های مؤثر محاسبه شدند، مشخص است. همان-

مقایسه روش‌های مختلف تحلیل قابلیت اطمینان

در این بخش با استفاده از داده‌های نشان داده شده در جدول ۱ اقدام به محاسبه فراسنجه قابلیت اطمینان و احتمال شکست لایه سنگچین محافظ در اطراف پایه پل می‌شود. در تحقیق حاضر از چهار روش FOSM، FORM، Spread Sheet و MCST برای تحلیل قابلیت اطمینان سنگچین در اطراف پایه پل استفاده شد. برای انجام این کار، یک برنامه به زبان ویژوال بیسیک در محیط نرم‌افزار اکسل نوشته شد. در جدول ۲ مقدار فراسنجه β و P_f مربوط به روش‌های فوق برای پایه پل بلک مونت ارائه شده است. در این جدول، برای تعیین شمار چرخه شبیه‌سازی در روش MCST از احتمال شکست روش FORM و شرایط $COV(P_f) = ۰/۰۵$ استفاده شد که حداقل شمار چرخه شبیه‌سازی نزدیک به ۱۰۰۰ به دست آمد. برای اطمینان از نتایج به دست آمده، شمار چرخه شبیه‌سازی در تحقیق حاضر برابر با ۱۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شد. همان‌گونه که قبلاً

هیدرولیکی لایه سنگچین استفاده می‌شود. این ضرایب با توجه به داوری مهندسی و آموزه‌های گذشته انتخاب می‌شوند. در نتیجه بدون شناسایی و کمی‌سازی معقول عدم قطعیت‌ها، می‌توان انتظار داشت که انتخاب بیش از حد ضریب ایمنی منجر به طرحی غیراقتصادی شود و مقدار کم آن کاهش ایمنی سازه را به دنبال داشته باشد. در پژوهش حاضر برای انتخاب ضریب ایمنی مناسب اقدام به کمی‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در پدیده هیدرولیکی شکست سنگچین از طریق تحلیل قابلیت اطمینان می‌شود. از آنجا که به‌طور معمول در روش‌های قطعی از میانگین داده‌ها (جدول ۱) استفاده می‌شود با استفاده از رابطه (۱) می‌توان نتیجه گرفت که ضریب ایمنی مربوط به اندازه سنگچین در شرایط پایه تنها $d_{50R} = 0/801 \text{ m}$ و پایه به همراه طوق و دیوار هدایت $d_{50R} = 0/092 \text{ m}$ برابر با $SF = 1$ است. در ادامه اقدام به افزایش فراسنجه d_{50R} در تحلیل قابلیت اطمینان می‌شود به گونه‌ای که با استفاده از نسبت مقدار جدید آن به مقدارهای فوق می‌توان به مقدار ضریب ایمنی (SF) جدید دست یافت. در نهایت با انجام تحلیل قابلیت اطمینان، ضریب قابلیت اطمینان هدف β محاسبه می‌شود. پس از انجام این کار، نموداری بین SF و β رسم شده و ارتباط بین این دو فراسنجه برآورد می‌شود. در جدول ۳ نتایج تحلیل قابلیت اطمینان لایه سنگچین در محل پایه پل بلک‌مونت در دو حالت بدون استفاده از طوق و دیوار هدایت و همچنین با استفاده از طوق و دیوار هدایت با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه اول ارائه شده است. در این جدول اندازه‌های مختلف سنگچین به‌همراه ضریب ایمنی، ضریب قابلیت اطمینان و احتمال شکست متناظر ارائه شده است. ضرایب ایمنی با استفاده از نسبت اندازه سنگچین انتخابی به سنگچین طراحی شده با روش قطعی یعنی در شرایط پایه تنها $d_{50R} = 0/801 \text{ m}$ و در شرایط پایه به‌همراه طوق و دیوار هدایت $d_{50R} = 0/092 \text{ m}$ محاسبه شدند. همچنین برای محاسبه ضرایب قابلیت اطمینان و احتمال های شکست متناظر با اندازه‌های سنگ انتخابی به ترتیب از رابطه‌های (۱۷) و (۱۰) استفاده شد. نتایج این جدول

گونه که در جدول ۲ مشخص است نتایج به‌دست آمده از روش FORM و Spread Sheet کاملاً بر هم منطبق بوده و بسیار نزدیک به نتایج به‌دست آمده از روش MCST است که این موضوع صحت نتایج FORM و Spread Sheet را نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان از این روش برای تحلیل اندازه پایدار سنگچین در اطراف پایه پل استفاده کرد. از طرفی نتایج روش FOSM اختلاف به‌نسبت زیادی با روش‌های دیگر دارد که این موضوع با توجه به دقت پایین این روش کاملاً طبیعی است. همچنین نتایج به‌دست آمده برای حالتی که پایه تنها وجود دارد مشابه با حالتی است که از طوق و دیوار هدایت در اطراف پایه استفاده شود.

با توجه به نتایج جدول ۲، احتمال شکست لایه سنگچین محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱) و به‌کارگیری ضریب اصلاح مدل $2/85$ در حدود 33% درصد است که به‌طور معمول در طرح‌های مهندسی قابل پذیرش نیست. همچنین مقدار ضریب قابلیت اطمینان سنگچین محافظ به‌کار رفته برابر با $\beta = 0/44$ به‌دست می‌آید که بسیار کم است. از آنجا که برابر نظر کمیته ایمنی سازه ضریب قابلیت اطمینان هدف یا مورد قبول در اعضای سازه‌ای باید نزدیک به 3 باشد (۷)، در نتیجه مقدار به‌دست آمده برای پل بلک‌مونت بسیار کم بوده و اندازه سنگچین به‌کار رفته نیاز به اصلاح دارند. در واقع با اینکه در محاسبه اندازه سنگچین از مقادیر میانگین فراسنجه‌های مؤثر استفاده شده است که روشی معمول در تحلیل‌های قطعی است ولی قابلیت اطمینان پایداری آن در محدوده مطلوب قرار ندارد. در واقع در صورتی که همه فراسنجه‌های مؤثر ثابت بمانند، اندازه سنگچین طرح شده نیاز به افزایش دارد تا ضریب قابلیت اطمینان در محدوده قابل قبول (نزدیک به 3) قرار گیرد.

ارائه ضریب ایمنی بر مبنای تحلیل قابلیت اطمینان

با توجه به ناشناخته بودن میزان عدم قطعیت‌ها در یک طراحی کلاسیک قطعی، از ضریب‌های ایمنی مختلف برای طراحی

جدول ۳. نتایج تحلیل قابلیت اطمینان لایه سنگچین در اطراف پایه پل بلک مونت

ردیف	بدون استفاده از طوق و دیوار هدایت		با استفاده از طوق و دیوار هدایت	
	d_{50R} (m)		d_{50R} (m)	
۱	۰/۸۰۱	۰/۴۴	۰/۰۹۲	۰/۴۳۴
۲	۱	۰/۸۹۸	۰/۱۱۵	۰/۱۸۵
۳	۱/۵	۱/۸۵	۰/۱۷۲	۰/۰۳۲
۴	۲	۲/۵۹	۰/۲۳۰	۰/۰۰۵
۵	۲/۳۴	۳	۰/۲۶۹	۰/۰۰۱
۶	۳	۳/۷۱	۰/۳۴۵	۰/۰۰۰۱

نشان می‌دهد که مقدار ضریب قابلیت اطمینان و احتمال شکست متناظر با اندازه سنگچین طرح شده به روش قطعی (ضریب اطمینان برابر با یک است) به ترتیب برابر با $\beta = 0/44$ و $P_f = 0/434$ محاسبه می‌شود که مقادیر غیرقابل قبولی در طراحی مهندسی هستند. در واقع عدم قطعیت‌های موجود در فراسنجه‌های مؤثر بر اندازه سنگچین می‌تواند قابلیت اطمینان لایه سنگچین را به شدت کاهش دهد به گونه‌ای که احتمال شکست سنگچین در حالتی که از روش قطعی برای طراحی اندازه سنگ استفاده شد، در حدود ۴۴ درصد است. در شرایط انتخاب $\beta = 3$ و احتمال شکست $0/001$ اندازه سنگچین به دست آمده در حالت بدون طوق و دیوار هدایت برابر با $d_{50R} = 2/34$ m و در حالت وجود طوق و دیوار هدایت $d_{50R} = 0/269$ m هستند. مقدار متناظر ضریب ایمنی در این حالت برابر با $SF = 2/92$ است. در ادامه با کاهش احتمال شکست سنگچین از مقدار $0/001$ تا $0/0001$ ، نیاز به افزایش اندازه سنگچین به میزان حدوداً ۳۰ درصد است. موزامیل و همکاران (۱۷) بیان کردند که برای رسیدن به شرایط انتخاب شده نیاز بود تا عمق قرارگیری شمع‌ها در محل این پل برابر با ۱۱/۵ متر باشد که البته این راهکار به علت وجود سازند سخت در محل اجرای پایه با مشکلاتی همراه بود (۳). به این ترتیب طراح می‌تواند با توجه به شرایط اقتصادی و اجرایی نسبت به انتخاب یکی از گزینه‌های: (۱) اجرای شمع بلند بدون سازه‌های حفاظتی که البته باید با توجه به وجود عمق آبستتگی اثرات

کاهش مقاومت اصطکاکی در آن لحاظ شود، (۲) اجرای سنگچین و (۳) اجرای سنگچین به همراه طوق و دیوار هدایت یکی را انتخاب کند. در نهایت با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول ۳ می‌توان رابطه‌ای خطی بین دو فراسنجه مهم طراحی‌ها به روش قطعی یعنی ضریب ایمنی (SF) و روش احتمالاتی بر مبنای تحلیل قابلیت اطمینان یعنی ضریب قابلیت اطمینان (β) به صورت زیر برقرار کرد:

$$SF = 0.85\beta + 0.43 \quad (20)$$

در شکل ۳ دقت مناسب رابطه فوق در برآورد داده‌های به دست آمده را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به این رابطه مشخص می‌شود که با افزایش ضریب قابلیت اطمینان، ضریب ایمنی نیز افزایش می‌یابد. به این ترتیب می‌توان به کمک رابطه (۲۰)، مقدار مناسب ضریب ایمنی را با توجه به ضریب قابلیت اطمینان هدف (انتخابی بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی) محاسبه کرد.

بررسی ارتباط مابین فراسنجه‌های مؤثر بر طراحی سنگچین
در بررسی فراسنجه‌های مختلف مؤثر بر پایداری سنگچین که در رابطه (۸) ارائه شده‌اند، مشخص می‌شود که این فراسنجه‌ها را می‌توان به چهار نوع مختلف تقسیم کرد: الف) فراسنجه‌های مربوط به مشخصات هندسی پایه شامل B عرض پایه، L طول پایه و θ زاویه برخورد جریان به پایه هستند. به لحاظ ماهیتی هیچ‌گونه ارتباطی بین این فراسنجه‌ها وجود ندارد. یعنی تغییر

این موضوع نشان‌دهنده همبستگی بالای مستقیم این دو فراسنجه است.

در ادامه برای بررسی اعمال ضریب همبستگی بر قابلیت اطمینان پایداری سنگچین، شاخص β از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود. در این معادله ماتریس ضرایب همبستگی به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} \rho_w & \rho_s & y & U & B & L & \theta & \lambda & d_{50R} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \rho_{y,U} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{U,y} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \rho_w \\ \rho_s \\ y \\ U \\ B \\ L \\ \theta \\ \lambda \\ d_{50R} \end{matrix} \quad (22)$$

در این ماتریس مربعی مقادیر همبستگی فراسنجه‌های مؤثر بر اندازه سنگچین قرار دارند که در بالا و سمت راست ماتریس مشخص شده‌اند. مقادیر صفر در این ماتریس نشان‌دهنده عدم همبستگی و مقادیر یک نشان‌دهنده همبستگی کامل هستند. در واقع هر فراسنجه با خود همبستگی کامل و مستقیم دارد. فراسنجه‌های $\rho_{y,U}$ و $\rho_{U,y}$ ضرایب همبستگی مابین فراسنجه‌های U و y را نشان می‌دهند که با توجه به خصوصیات مفهوم کواریانس با هم برابرند (۴).

در ادامه برای بررسی اثر ضریب همبستگی بین فراسنجه‌ها بر قابلیت اطمینان پایداری سنگچین در اطراف پایه پل، ماتریس R در رابطه (۱۷) قرار داده شد و مقدار شاخص قابلیت اطمینان β در این شرایط محاسبه شد. جدول ۴ مقادیر مختلف ضریب β را با توجه به مقادیر مختلف ضریب همبستگی $\rho_{U,y}$ نشان می‌دهد. با توجه به نتایج محاسبات انجام شده مقدار ضریب $\rho_{U,y}$ در محدوده ۰/۹ تا ۰/۹۸ قرار دارد ولی برای بررسی محدوده‌های بیشتر، محدوده این ضریب از مقدار صفر (عدم همبستگی بین دو فراسنجه) تا مقدار یک در جدول ۴ در نظر گرفته شد و مقدار ضریب β متناظر محاسبه

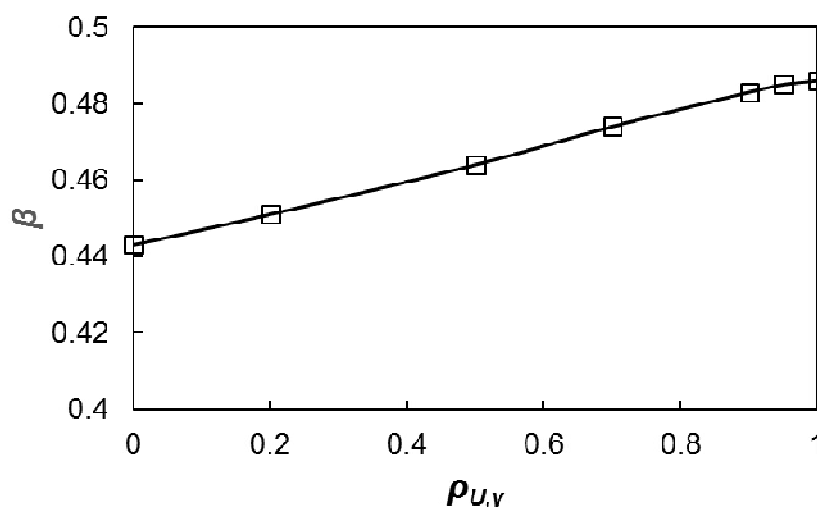
یکی موجب تغییر در دیگری نمی‌شود. در نتیجه می‌توان ضریب همبستگی بین این فراسنجه‌ها را صفر در نظر گرفت. (ب) فراسنجه مربوط به شرایط بستر حفاظت شده شامل ρ_s چگالی سنگچین است که مشخصه‌ای از نوع سنگ استخراج شده است و ارتباطی به فراسنجه‌های دیگر ندارد. (ج) فراسنجه مربوط به دقت مدل محاسبه شده یعنی λ که ارتباطی با فراسنجه‌های دیگر ندارد. (د) فراسنجه‌های مربوط به شرایط جریان شامل U سرعت جریان، y عمق جریان و ρ_w چگالی سیال هستند. بررسی بین این فراسنجه‌ها نیز نشان می‌دهد که ارتباط معناداری بین U سرعت جریان و y عمق جریان وجود دارد. به این ترتیب بین تمامی فراسنجه‌های مؤثر بر شکست سنگچین ارتباط بین U و y معنادار است که لازم است مقدار این ارتباط مشخص شود. ارتباط بین فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان شامل U و y را می‌توان با روش‌های مختلف در مهندسی رودخانه تعیین کرد. یکی از محبوب‌ترین روش‌ها استفاده از معادله مانینگ است که برای یک کانال روباز با مقطع دوزنقه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} = \frac{S^{1/2}}{n} \cdot \left(\frac{(w + yz)y}{w + 2y\sqrt{1+z^2}} \right)^{2/3} \quad (21)$$

که در آن n ضریب مانینگ، S شیب طولی رودخانه و R_h شعاع هیدرولیکی مقطع که با توجه به شکل مقطع تابعی از عمق جریان y و بقیه فراسنجه‌های مقطع است. همانگونه که در شکل ۲ مشخص است مقطع یک رودخانه را می‌توان به شکل یک دوزنقه فرض کرد. در رابطه (۲۱) مقدار R_h برحسب y عمق جریان، w عرض کف کانال و z شیب جداره (z واحد افقی در برابر ۱ واحد عمودی) برای یک مقطع دوزنقه ارائه شده است. در صورتی که مقدار $z = 0$ باشد مقطع به صورت مستطیلی است. در تحقیق حاضر با توجه به مقادیر مختلف z اقدام به محاسبه ضریب همبستگی دو فراسنجه U و y یعنی $(\rho_{U,y})$ با استفاده از رابطه (۱۹) شد. نتایج نشان داد که با تغییر مقدار z از صفر تا ۲، مقدار ضریب همبستگی از ۰/۹ تا ۰/۹۸ تغییر می‌کند به گونه‌ای که با افزایش مقدار z ، ضریب همبستگی نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴. تأثیر ضریب همبستگی فراسنجه‌های هیدرولیکی $\rho_{U,y}$ بر روی ضریب قابلیت اطمینان و احتمال شکست سنگچین

ردیف	$\rho_{U,y}$	β	Pf
۱	۱	۰/۴۸۶	۰/۳۱۴
۲	۰/۹	۰/۴۸۲	۰/۳۱۵
۳	۰/۷	۰/۴۷۳	۰/۳۱۸
۴	۰/۵	۰/۴۶۴	۰/۳۲۱
۵	۰/۲	۰/۴۵۱	۰/۳۲۶
۶	۰	۰/۴۴۳	۰/۳۲۹

شکل ۴. تغییرات ضریب همبستگی هیدرولیکی $\rho_{U,y}$ بر روی ضریب قابلیت اطمینان

کمی‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در یک مسئله مهندسی مطرح است. در این روش با استفاده از علم احتمالات، اطلاعات مفیدی در مورد پایداری و یا شکست یک سازه مهندسی به دست می‌آید. در مقاله حاضر مطالعه طراحی لایه سنگچین برای حفاظت از آبشستگی در اطراف پایه پل در شرایط واقعی بر اساس روش تحلیل قابلیت اطمینان صورت می‌گیرد. برای این منظور ضمن بررسی چهار روش مختلف انجام تحلیل قابلیت اطمینان شامل FORM، FOSM، Spread sheet و MCST، در نهایت با استفاده از روش Spread sheet که یک روش جایگزین برای حل کلاسیک روش FORM محسوب می‌شود اقدام به مطالعه پایداری سنگچین در اطراف پایه‌های یک نمونه پل واقعی به عنوان مطالعه موردی (پل بلک

شد. همچنین در شکل ۴ تغییرات ضریب β نسبت به مقدار ضریب $\rho_{U,y}$ رسم شده است. همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۴ مشخص است با افزایش ضریب همبستگی $\rho_{U,y}$ مقدار ضریب β افزایش یافته و احتمال شکست P_f کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که با افزایش مقدار $\rho_{U,y}$ از صفر تا یک مقدار ضریب β به میزان حدوداً ۹ درصد افزایش می‌یابد. به این ترتیب نتیجه‌گیری مهم تحقیق حاضر نشان می‌دهد که عدم اعمال ضریب همبستگی هیدرولیکی موجب می‌شود نتایج تحلیل قابلیت اطمینان با تغییر کمی در جهت ایمنی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

روش تحلیل قابلیت اطمینان به عنوان یک ابزار مناسب برای

ضریب همبستگی بین فراسنجه‌های مؤثر بر اندازه سنگچین طراحی بر قابلیت اطمینان اندازه سنگچین شد. بررسی‌ها نشان داد که تنها بین دو فراسنجه سرعت و عمق جریان همبستگی مستقیم وجود دارد، چرا که افزایش دبی جریان در مقطع علاوه بر افزایش عمق جریان، موجب افزایش سرعت متوسط مقطع نیز می‌شود. محاسبات مربوط به ضریب همبستگی بین این دو فراسنجه در محل ساخت پل نشان داد که مقدار این ضریب بین ۰/۹ تا ۰/۹۸ است. در نهایت نتایج نشان داد که اعمال ضریب همبستگی در این محدوده تأثیر ناچیزی بر افزایش ضریب قابلیت اطمینان سنگچین دارد و با افزایش ضریب همبستگی از مقدار صفر (حالت استقلال خطی) تا ۱ مقدار ضریب قابلیت اطمینان به میزان ۹ درصد افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق قرارداد شماره ۱۴۱۱۰ مورخ ۲۰/۸/۹۹ انجام شده است. به این وسیله نویسنده کمال تشکر خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی اعلام می‌دارد.

مونت در نیوزیلند) می‌شود. علت انتخاب این روش توانایی بالای آن در تحلیل قابلیت اطمینان یک پدیده در زمان کوتاه و با دقت مناسب است. همچنین از رابطه طراحی کریمایی و زراتی (۸) به‌عنوان تابع حالت حدی در تحلیل قابلیت اطمینان استفاده شد. با توجه به مشخصات احتمالاتی داده‌های طراحی در محل پل بلک‌مونت نظیر میانگین، واریانس و نوع توزیع فراسنجه‌ها اقدام به محاسبه ضریب قابلیت اطمینان و احتمال شکست اندازه‌های مختلف سنگچین انتخابی در محل این پل شد. سنگچین‌های انتخاب شده با توجه به اندازه سنگچین طراحی به‌روش قطعی تعیین شد و نسبت اندازه هر سنگچین انتخاب شده به سنگچین طراحی به‌عنوان ضریب ایمنی طراحی در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل حاضر نشان داد که ارتباطی خطی بین ضریب ایمنی طراحی و ضریب قابلیت اطمینان وجود دارد و مقدار ضریب ایمنی در شرایط ضریب قابلیت اطمینان هدف که در اکثر آیین‌نامه‌ها ۳ است برابر با ۲/۹۲ است. همچنین با توجه به اینکه مقدار احتمال شکست در حالت ضریب قابلیت اطمینان ۳ برابر با ۰/۰۰۱ است با افزایش این احتمال شکست به ۰/۰۰۰۱ نیاز به افزایش اندازه سنگچین انتخابی به میزان ۳۰ درصد است. در ادامه اقدام به بررسی

منابع مورد استفاده

- Arneson, L. A., L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasseand and P. E. Clopper. 2013. Evaluating scour at bridges (5th edition). Hydraulic Engineering Circular, No. 18, FHWA-HIF-12-003.
- Briaud, J. L., P. Gardoni and C. Yao. 2014. Statistical, Risk, and Reliability Analyses of Bridge Scour. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 140(2): 04013011. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000989.
- Coleman, S. and B. Melville. 2001. Case study: New Zealand bridge scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(7): 535-546.
- Halder, A. and S. Mahadevan. 2000. Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design. John Wiley & Son, P: 161, New York.
- Johnson, P. and D. Dock. 1998. Probabilistic bridge scour estimates. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(7): 750-754.
- Johnson, P. and S. Niezgoda. 2004. Risk-based method for selecting bridge scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(2): 121-128.
- Joint Committee on Structural Safety (JCSS). Available online at: <http://www.jcss.ethz.ch/>.
- Karimaei Tabarestani, M. and A. Zarrati. 2013. Design of stable riprap around aligned and skewed rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(8): 911-916.
- Karimaei Tabarestani, M., A. Zarrati, M. Mashahir and E. Mokallaf. 2015. Extent of riprap layer with different stone sizes around rectangular bridge piers with or without an attached collar. *Scientia Iranica* 22(3): 709-716.
- Karimaei Tabarestani, M. and A. Zarrati. 2019. Reliability analysis of riprap stability around bridge piers. *Journal of Applied Water Engineering and Research* 7(1): 79-88.

11. Karimaei Tabarestani, M., A. Salamatian and M. Panahi. 2020. Component and system-level reliability analysis of riprap layer around bridge pier in clear water condition. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. DOI:10.1080/09715010.2019.1711206.
12. Karimaei Tabarestani, M. 2020. Study on stability and sensitivity analysis of protective riprap layer placed around bridge pier by using reliability analysis theory. *Journal of Hydraulic* 14(4): 51-68. (In Farsi).
13. Lagasse, P. F., P. E. Clopper, L. W. Zevenbergen and L. G. Girard. 2007. Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour. NCHRP Rep. 593, Transportation Research Board, NAS, Washington, DC.
14. Lauchlan, C. S. and B. Melville. 2001. Riprap protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(5): 412-418.
15. Low, B. K. and W. H. Tang. 2007. Efficient spreadsheet algorithm for first order reliability method. *Journal of Engineering Mechanics* 133(12): 1378-1387.
16. Mashahir, M., A. Zarrati, and E. Mokallaf. 2010. Application of riprap and collar to prevent scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 136(3): 183-187.
17. Muzzammil, M., N. A. Siddiqui and A. F. Siddiqui. 2008. Reliability considerations in bridge pier scouring. *Journal of Structural Engineering and Mechanics* 28(1): 1-18.
18. Nowak, A. S. and K. R. Collins. 2000. Reliability of Structures. McGraw Hill, Singapore.
19. Pizarro, A. and E. Tubaldi. 2019. Quantification of modelling uncertainties in bidge scour risk assessment under multiple flood events. *Geosciences* 9(10): 445-460.
20. Rashno, E., A. Zarrati and M. Karimaei Tabarestani. 2020. Design of riprap for bridge pier groups. *Canadian Journal of Civil Engineering*. DOI: 10.1139/cjce-2019-0007.
21. Salamatian, A., A. Zarrati and M. Banazadeh. 2013. Assessment of bridge safety due to scour by Bayesian network. *Journal of Water Management* 166(6): 341-350.
22. Salamatian, A. and A. Zarrati. 2019. Reliability study on uncertainty parameters and flood duration on scouring around unprotected and protected bridge piers. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 1-9. DOI: 10.1080/09715010.2019.1570360.
23. Tafarajnoruz, A., R. Gaudio and S. Dey. 2010. Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: a review. *Journal of Hydraulic Research* 48(4): 441-452.
24. Wu, Y. and Z. Luo. 2020. Life-cycle system reliability-based approach for bridge pile foundations underscour conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering* 24(2): 412-423.
25. Yanmaz, A. M. 2003. Reliability based assessment of erodible channel capacity. *Turkish Journal of Engineering Environmental Science* 27(4): 265-273.

Effect of the Correlation between Hydraulic Parameters on the Reliability Analysis of a Riprap Designed around Bridge Pier

M. Karimaei Tabarestani^{1*}

(Received: June 25-2020 ; Accepted: September 19-2020)

Abstract

One of the most common and practical methods in controlling the local scour around bridge pier is to place a protective riprap layer. Due to various uncertainties in the design of this countermeasure method, in the present study, the reliability analysis method was applied for the design of a riprap size around a real bridge pier as a case study. Therefore, four different methods including First Order Second Moment, First Order Reliability Method, Spread Sheet and Monte Carlo Simulation Technique were used to quantify the uncertainties and design of riprap size. The results showed that the probability of riprap size failure, which was calculated by the empirical equation and the use of the mean value of effective parameters in the case study, was very high, nearly 34%. In the following, the relationship between safety factor and the reliability index at the site of this case study was determined. Finally, in order to achieve more realistic results, the hydraulic correlation coefficient between depth and flow velocity parameters and its effect on the probability of the riprap failure were studied. It was shown that the correlation coefficient between these two hydraulic parameters was very high and more than 90%, and its maximum effect on the probability of the riprap failure was less than 10%.

Keywords: Scour, Bridge pier, Riprap, First Order Reliability Method, Correlation coefficient

1. Geotechnical and Water Engineering Group, Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran.

Corresponding author, Email: karimaei@sru.ac.ir