

تحلیل قابلیت اطمینان روابط تخمین عمق آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل‌ها

عبدالرضا کبیری سامانی* (دانشیار)

نیلوفر مهین پرور (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

امین سلامتیان (دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۷ (۳۱-۳۰)
دوره‌ی ۲ - شماره‌ی ۳/۲، ص. ۳۱-۳۰

محاسبه‌ی عمق آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل‌ها با عدم قطعیت‌های فراوانی مواجه است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در هیدرولیک پل‌ها، استفاده از آنالیز قابلیت اطمینان جهت دستیابی به میزان ایمنی و اعتمادپذیری در تحلیل و طراحی یک پل ضروری است. در پژوهش حاضر، به منظور توسعه‌ی کاربرد آنالیز ریسک و قابلیت اطمینان در تحلیل ایمنی پل‌ها به محاسبه‌ی قابلیت اطمینان روابط آب‌شستگی تکیه‌گاه پل‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در پدیده‌ی مذکور در شرایط جریان دائمی پرداخته شده است. پارامترهای مؤثر، شامل: ابعاد کانال، شکل تکیه‌گاه، خصوصیات رسوب، سیال و مشخصات جریان است. برای برآورد احتمال شکست روابط مختلف از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده و شاخص قابلیت اطمینان روابط مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. روابط موجود با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی و در نهایت، رابطه با احتمال شکست کمتر و شاخص اطمینان مطلوب‌تر و بیشترین تطابق با داده‌های آزمایشگاهی به‌عنوان رابطه‌ی مطلوب پیشنهاد شده است. معیار دیگر جهت انتخاب رابطه‌ی مطلوب‌تر، شاخص بهره‌وری بالاتر بوده است. نتایج نشان می‌دهد که احتمال شکست و شاخص اطمینان با یکدیگر سازگار هستند. با افزایش ضریب ایمنی، احتمال شکست کاهش و شاخص قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: عدم قطعیت، تحلیل ریسک، آب‌شستگی، تکیه‌گاه پل، شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

۱. مقدمه

بررسی آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل، یکی از موضوعات مهم علم هیدرولیک است. مطالعات انجام‌شده بر روی شکست ۳۸۳ پل در ایالات متحده‌ی آمریکا نشان می‌دهد که ۲۵٪ شکست پل‌ها ناشی از تخریب پایه و در ۷۲٪ آن‌ها تخریب تکیه‌گاه پل، عامل شکست پل بوده است.^[۱] تکیه‌گاه‌های پل، پایه‌های چسبیده به ساحل رودخانه هستند که بخشی از مقطع رودخانه را محدود می‌کنند. بدین ترتیب سرعت متوسط و دبی بر واحد عرض در محل سازه افزایش می‌یابد که منجر به آشفته‌گی بیشتر جریان در اطراف سازه می‌شود. علاوه بر پیچیدگی‌های کلی میدان جریان در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها، آشفته‌گی جریان، پوشش گیاهی و ضریب زبری رودخانه از ویژگی‌های برجسته‌ی هستند که منجر به دشواری شبیه‌سازی هیدرولیکی پدیده‌ی آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها می‌شوند.

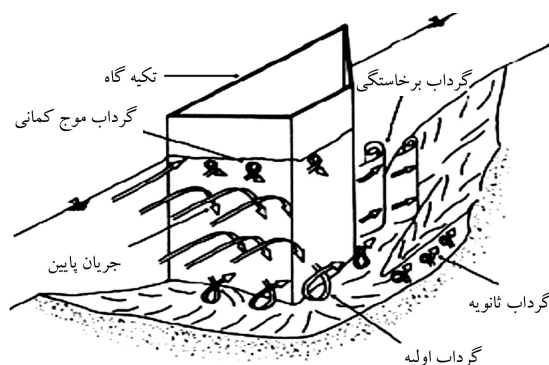
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۲/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۸/۱۰، پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۱۸.

DOI: 10.24200/J30.2018.1400

الگوی جریان و پدیده‌ی آب‌شستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه پل‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود.^[۲]

مجموعه‌ی وسیعی از آزمایش‌ها در سال ۱۹۹۹، به منظور بررسی تأثیر سرعت جریان در عمق آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل‌ها در شرایط آب‌شستگی آب زلال و بستر زنده انجام شدند و براساس نتایج حاصل، بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی در آب‌شستگی آب زلال هنگامی رخ می‌دهد که سرعت جریان برابر سرعت بحرانی حرکت رسوبات باشد.^[۳] برخی پژوهشگران نیز دریافته‌اند که توزیع سرعت در تکیه‌گاه‌ها، چولگی کمتری نسبت به توزیع سرعت در اطراف پایه‌های پل دارد.^[۴] براساس مطالعاتی در سال ۲۰۰۴، در ارتباط با روند آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه پل با مقاطع مستطیلی، دوزنقه‌ی و نیم‌دایره‌ی مشخص شد که گردابه‌های اولیه در بالادست تکیه‌گاه، شدت بیشتری دارند و در کناره‌های تکیه‌گاه کاهش می‌یابند که علت آن ایجاد آشفته‌گی در بالادست تکیه‌گاه است و باعث ایجاد گردابه‌های اولیه‌ی قوی می‌شود.^[۵]



شکل ۱. الگوی جریان و پدیده‌ی آب‌شستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه پل.^[۲]

میدان جریان در شرایط آب‌شستگی به دلیل پیچیدگی معادلات حاکم در سه فاز رسوب، آب، و هوا بسیار دشوار است، بیشتر مطالعات در زمینه‌ی آب‌شستگی به صورت آزمایشگاهی و تجربی انجام شده است. تاکنون پژوهش‌های جامع در خصوص بررسی قابلیت اطمینان روابط آب‌شستگی تکیه‌گاه پل، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با غالب پارامترهای درگیر در پدیده‌ی مذکور صورت نگرفته است. اگرچه پژوهش انجام شده توسط پژوهشی در سال ۲۰۰۱،^[۱۴] به تحلیل قابلیت اطمینان آب‌شستگی تکیه‌گاه پل معطوف بوده است، ولی فقط عدد فرود بالادست و طول نسبی تکیه‌گاه به عنوان پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی منظور شده‌اند. بر این اساس در پژوهش حاضر، آنالیز قابلیت اطمینان روابط آب‌شستگی تکیه‌گاه پل با در نظر گرفتن آثار پارامترهای مختلف، نظیر: عمق و سرعت جریان بالادست، اندازه‌ی ذرات، شکل پایه، پارامتر شیلدز بحرانی و نرخ انقباض با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در شرایط جریان دائمی انجام شده است. روابط موجود با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده و در نهایت، رابطه با احتمال شکست کمتر و شاخص اطمینان مطلوب‌تر و بیشترین تطابق با داده‌های آزمایشگاهی پیشنهاد شده است.

۲. مبانی تئوری و معادلات حاکم

برای تعیین اعتمادپذیری سیستم‌ها و پدیده‌های هیدرولیکی، مفاهیم آماری و احتمالاتی ویژه‌ی به‌کار می‌رود. شکست یک سیستم به‌عنوان وقوع شرایطی است که در آن سیستم قادر به ایفای نقش مناسب در مقابل اهداف طراحی نباشد. احتمال شکست سیستم به‌عنوان تجاوز بار از مقاومت به‌صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:^[۱۷]

$$P_f = P[L > R] \quad (۱)$$

که در آن، P_f ریسک (احتمال شکست)، L بار و R مقاومت است. اعتمادپذیری سیستم (P_r) نیز توسط رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$P_r = 1 - P_f = P[L \leq R] \quad (۲)$$

اگر بار و مقاومت به ترتیب توابعی از k و m متغیر تصادفی باشند، آنگاه توابع بار و مقاومت با استفاده از روابط ۳ و ۴ تعریف می‌شوند:

$$L = g_L(x_i) \quad i = 0, 1, 2, \dots, k \quad (۳)$$

$$R = g_R(x_j) \quad j = 0, 1, 2, \dots, m \quad (۴)$$

فرض می‌شود که بار و مقاومت از نظر آماری مستقل هستند. لذا احتمال شکست تابع به‌صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$P_f = \int_0^{\infty} f_L(l) \left[\int_0^l f_R(r) dr \right] dl = \int_0^{\infty} f_L(l) F_R(r) dl \quad (۵)$$

که در آن، $f_{R,L}(r, l)$ تابع احتمال ترکیبی بار و مقاومت و $f_R(r)$ تابع تجمعی احتمال مقاومت است.^[۱۷] در ارتباط با آنالیز ریسک، شکست توسط رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$P_f = P[Z < 0] \quad (۶)$$

که در آن، Z تابع عملکرد یا تابع شکست است. به این ترتیب معادل منفی شدن مقدار تابع عملکرد است. معیار سنجش قابلیت اطمینان، پارامتری به نام

با توجه به مطالب ذکر شده، پدیده‌ی آب‌شستگی به دلایل مختلفی، از جمله: تغییر در عمق و سرعت جریان، وضعیت تکیه‌گاه و شرایط بستر بسیار پیچیده است. از سوی دیگر، به دلیل دشواری تعیین پارامترهای مورد اشاره در شرایط و مناطق مختلف و همچنین اندک بودن مطالعات انجام شده، روابط مذکور عدم قطعیت‌های فراوانی دارند. ارزیابی ریسک، این فرصت را به پژوهشگران می‌دهد که با در نظر گرفتن بسیاری از داده‌های غیرقطعی در ارتباط با تصمیم‌گیری‌های مربوط به ایمنی پل‌ها، به ارزیابی کیفی و کمی شرایط ایمنی پل بپردازند.^[۶] نتیجه‌ی قابل انتظار از تحلیل قابلیت اطمینان روابط آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل، تعیین ویژگی‌های عدم قطعیت خروجی سیستم به‌صورت تابعی از عدم قطعیت‌های روابط مورد استفاده و متغیرهای آماری موجود است. همچنین برخی پژوهشگران به آنالیزهای عدم قطعیت و قابلیت اطمینان در مسائل مهندسی عمران در موارد مختلف توجه کرده‌اند.^[۷-۱۲] برای مثال، در پژوهشی در سال ۲۰۰۱، با استفاده از ۲۰۷ داده‌ی آزمایشگاهی، قابلیت اطمینان پدیده‌ی آب‌شستگی اطراف پایه‌های گرد در حالت بستر متحرک بررسی و از توزیع لوگ نرمال به‌عنوان تابع چگالی احتمال بار و مقاومت استفاده شده است. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که میانگین بار از مقاومت بیشتر است و منفی شدن شاخص اطمینان نشان داد که احتمال شکست بالاست.^[۱۳]

همچنین یک مدل تحلیل قابلیت اطمینان در ارتباط با آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در سال ۲۰۰۴ توسعه داده شد و در آن از یک مدل استاتیکی قابلیت اطمینان برای ارزیابی اطمینان‌پذیری آب‌شستگی موضعی تکیه‌گاه پل‌ها با طول محدود استفاده شد. مدل ارائه شده متکی بر روش استنتاجی بار - مقاومت بوده و در آن تراز نسبی پی به‌عنوان مقاومت و عمق نسبی و عدد فرود جریان بالادست به‌عنوان بار و تابع توزیع لوگ نرمال به‌عنوان تابع چگالی احتمال برای هر دو منظور شده است. نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که توافق خوبی بین نتایج مدل ارائه شده و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو وجود دارد.^[۱۴]

در پژوهش دیگری نیز قابلیت اطمینان روابط ارائه شده در پژوهش‌های پیشین در تخمین آب‌شستگی پایه‌ی پل‌ها بررسی شد و در آن، آنالیز قابلیت اطمینان به دور روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و قابلیت اطمینان مرتبه‌ی اول انجام شده است.^[۱۵] همچنین پژوهش‌های جامع در ارتباط با استفاده از روش‌های مختلف احتمال شکست پایه‌ی پل تحت تأثیر آب‌شستگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها انجام شده است. بر اساس نتایج حاصل، در صورت عدم برقراری همبستگی بین پارامترهای حاکم، مقدار خطای به‌وجود آمده در نتایج قابلیت اطمینان، حدود ۱۴٪ است که در صورت همبستگی بین پارامترها، خطای ذکر شده به ۶٪ کاهش می‌یابد.^[۱۶] بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل همواره به‌عنوان موضوعات مهم مورد توجه بوده است و از آنجا که بررسی تحلیلی و عددی

σ_g انحراف معیار هندسی، K_s ضریب شکل، K_G ضریب هندسی کانال و K_θ ضریب تعدیل است. به این ترتیب متغیرهای درگیر در عملکرد آب‌شستگی تکیه‌گاه پل (x_i ها)، تابع معیار عملکرد سیستم را تشکیل می‌دهند (روابط ۱۱ و ۱۲):

$$Z = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) \quad (11)$$

$$Z = d_a - Y_s \quad (12)$$

که در آن‌ها، Z اختلاف دو عمق، d_a تراز استقرار پی و Y_s عمق آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل است. $Z > 0$ تابع هدف در شرایط اطمینان را نشان می‌دهد. لذا احتمال شکست با استفاده از رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود: [۱۷]

$$P_f = \iiint g(x) < 0 f(x)(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) dx_1 dx_2 dx_3 \dots dx_n \quad (13)$$

که در آن، $f(x)(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)$ تابع چگالی احتمال ترکیبی برای متغیرهای $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)$ است. مفهوم مقابل آن اعتمادپذیری (P_r) است که به صورت رابطه‌ی ۱۴ تعریف می‌شود:

$$P_r = P(d_a - Y_s > 0) = P(d_a > Y_s) \quad (14)$$

رابطه‌ی ۱۴، معادله‌ی اساسی قابلیت اطمینان روابط آب‌شستگی تکیه‌گاه پل است. هر یک از پارامترهای درگیر در روابط تعیین عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل، یک تابع چگالی احتمال دارد که به‌وسیله‌ی نحوه‌ی توزیع (نرمال، لوگ نرمال و سایر) و خواص توزیع (میانگین، انحراف معیار، چولگی و سایر) تعریف می‌شود.

در آنالیز قابلیت اطمینان آب‌شستگی تکیه‌گاه پل، عواملی نظیر شکل تکیه‌گاه متغیرهای قطعی است و عواملی نظیر نرخ زمانی آب‌شستگی و فرسایش‌پذیری مواد، متغیرهای بسیار پیچیده‌ی غیرقطعی هستند. تعیین میانگین و ضریب تغییرات پارامترهای ذکرشده، نیازمند داده‌های آزمایشگاهی است. در مطالعه‌ی حاضر، جهت تعیین پارامترهای آماری، از قبیل: تابع چگالی احتمال، میانگین، و ضریب تغییرات پارامترها ضمن انجام آنالیزهای سعی و خطایی از فرضیات پژوهشگران پیشین به شرح جدول ۱ استفاده شده است. [۱۵، ۱۶، ۲۰] در جدول ۱، برای تراز استقرار پی نیز شرایط عدم قطعیت ساخت در نظر گرفته شده است. در تحلیل قابلیت اطمینان تکیه‌گاه پل با تعیین مشخصات آماری، شامل: مشخصات هیدرولیکی جریان، مشخصات رسوبات و مشخصات تکیه‌گاه پل، معادله‌ی سطح شکست تعیین می‌شود.

روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، پاسخ تابع عملکرد ضریب اطمینان را نسبت به متغیرهای ورودی که به‌طور تصادفی انتخاب و در تابع عملکرد جایگزین می‌شوند، شبیه‌سازی می‌کند. در روش مذکور برای هر پارامتر ورودی که به‌طور تصادفی در نظر گرفته شده است، با توجه به شکل تابع چگالی احتمال آن و نیز با در نظر گرفتن دامنه‌ی تغییراتش، n عدد تصادفی ایجاد می‌شود. سپس مقدار تابع عملکرد Z برای هر تکرار محاسبه و در نهایت n داده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای هر یک از روابط تولید می‌شود. برای انجام آنالیز قابلیت اطمینان آب‌شستگی تکیه‌گاه پل به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، باید تعداد زیادی عملیات تکراری صورت گیرد. از لحاظ تئوری هر چه تعداد تکرار بیشتر باشد، دقت محاسبات بیشتر خواهد شد و میزان واریانس و کواریانس احتمال شکست کاهش می‌یابد. [۱۷] با توجه به اینکه براساس بررسی سعی و خطای انجام‌شده، پارامترهای مؤثر از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، لذا از توزیع نرمال برای آنالیز احتمالی عملکرد آب‌شستگی استفاده شده است.

شاخص قابلیت اطمینان (β) است. شاخص قابلیت اطمینان به‌عنوان نسبت مقدار میانگین تابع عملکرد (μ_x)، به انحراف معیار تابع عملکرد (σ_x) تعریف می‌شود. در واقع شاخص قابلیت اطمینان عکس ضریب تغییرات تابع عملکرد است. [۱۷]

$$\beta = \frac{\mu_x}{\sigma_x} \quad (7)$$

در مورد تمام توزیع‌های احتمال با افزایش شاخص قابلیت اطمینان، اعتمادپذیری سیستم افزایش می‌یابد. حال اگر این تابع از تفاضل ظرفیت و نیاز تشکیل شده باشد و ظرفیت و نیاز متغیرهای ناهمبسته و با توزیع نرمال باشند، تابع عملکرد $Z = R - L$ نیز توزیع نرمال دارد. ضمناً احتمال شکست با استفاده از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود: [۱۷]

$$P_f = \Phi^{-1}(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (8)$$

و شاخص قابلیت اطمینان با استفاده از رابطه‌ی ۹ به‌دست می‌آید: [۱۷]

$$\beta = \left(\frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \right) \quad (9)$$

در ادامه، مبنای روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو که در پژوهش حاضر استفاده شده، معرفی شده است. روش مونت‌کارلو، در واقع یک شبیه‌سازی عددی به منظور تولید متغیرهای تصادفی براساس خصوصیات آماری خاص مربوط به هر متغیر است. در روش مذکور در هر تکرار، یک سری اعداد تصادفی تولید و مدل با آن‌ها اجرا می‌شود. سپس متغیر شمارنده‌ی تعریف می‌شود که اگر پس از هر اجرا به جواب دلخواه نرسد، مقدار آن یک واحد افزایش می‌یابد. در پایان آخرین تکرار، ریسک از تقسیم شمارنده‌ی مذکور به تعداد کل تکرارها به‌دست می‌آید. [۱۸] در حقیقت ریسک از تقسیم تعداد خروجی‌های منفی به تعداد کل اجراها به‌دست می‌آید. در نهایت، تابع چگالی احتمال (PDF) هر یک از کمیت‌های ورودی تعیین می‌شود. تولید اعداد تصادفی، پایه‌ی روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو است. از جمله روش‌های تولید اعداد تصادفی، روش تجانس است. [۱۹] در روش تجانس برای شروع به یک مقدار پایه نیاز است، که به آن بذر^۲ گفته می‌شود. با روش مذکور یک سری از اعداد تصادفی پرودیک تولید می‌شود. پس از تولید عدد تصادفی، باید به کمک آن متغیر تصادفی تولید شود. برای این منظور از الگوریتم‌های تولید متغیر تصادفی نظیر: روش معکوس CDF، روش رد - پذیرش^۳ و روش انتقال متغیر استفاده می‌شود. [۱۹] در آنالیز اعتمادپذیری برای محاسبه‌ی ریسک یا اعتمادپذیری سیستم به انتگرال‌گیری نیاز است. یک روش ساده برای انتگرال‌گیری به روش مونت‌کارلو، روش برخورد و خطاست^۴. در پژوهش حاضر از تمامی مبنای و اصول مورد اشاره جهت شبیه‌سازی آب‌شستگی تکیه‌گاه پل استفاده شده است. مدل‌های ارائه‌شده برای ارزیابی روابط آب‌شستگی تکیه‌گاه پل، هرکدام نقاط ضعف و قوت دارند که در نتیجه به پارامترهایی با عدم قطعیت متفاوت منجر می‌شوند.

۳. مدل‌سازی و روش انجام پژوهش

رابطه‌ی عمومی آب‌شستگی تکیه‌گاه پل به‌صورت معادله‌ی ۱۰ تعریف شده است: [۱۹]

$$\frac{Y_s}{d_c} = f(F_r, \frac{L}{d_c}, \frac{L}{d_c}, \sigma_g, K_s, K_G, K_\theta) \quad (10)$$

که در آن، Y_s عمق چاله‌ی آب‌شستگی، d_c عمق جریان، F_r عدد فرود جریان بالادست، L طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان، d_{50} اندازه‌ی متوسط ذرات رسوب،

جدول ۱. خواص آماری پارامترهای آب‌شستگی تکیه‌گاه پل.

پارامتر	میانگین	ضریب تغییرات	تابع توزیع	مرجع
$d_s(m)$	۲	۰٫۲۳	نرمال	[۱۵]
$U(m/s)$	۰٫۴	۰٫۳۲۹	نرمال	[۱۶]
$d_{50}(mm)$	۰٫۷۵	۰٫۰۵	یکنواخت	[۲۰]
K_s	۰٫۸۲	۰٫۱	یکنواخت	[۲۰]
K_θ	۱	۰٫۱	یکنواخت	[۲۰]
K_G	۱	۰٫۱	نرمال	[۲۰]
θ_c	۰٫۴۵	۰٫۲۵	نرمال	[۱۵]
$\gamma(gr/cm^3)$	۰٫۹۸۱	-	قطعی	[۱۵]
$\gamma_s(gr/cm^3)$	۲٫۷۵	-	قطعی	[۱۶]
$L(m)$ طول تکیه‌گاه	۹	-	قطعی	[۱۶]
$b(m)$ عرض تکیه‌گاه	۲	۰٫۰۵	نرمال	[۱۶]
β نرخ انقباض	۱٫۸	۰٫۲	نرمال	[۲۰]
$d_a(m)$ تراز استقرار پی	۱٫۵	۰٫۰۱	نرمال	[۱۵]
S	۰٫۰۰۴۵	۰٫۲۵	لوگ نرمال	[۱۵]

جدول ۲. پارامترهای آماری داده‌های اندازه‌گیری در مرجع [۲۲].

پارامتر	بازه تغییرات	میانگین	انحراف معیار
$d_s(mm)$	[۳۸ - ۶۰۰]	۲۱۰٫۹۵	۱۴۱٫۴۲
$U(m/s)$	[۰٫۱۷ - ۳٫۳]	۰٫۶۴	۰٫۷۱
$d_{50}(mm)$	[۰٫۸ - ۱٫۰۲]	۰٫۸۹	۰٫۰۶۲
$Y_s(mm)$	[۴۳ - ۷۴۷]	۲۵۸٫۲۹	۱۲۷٫۶۷

جدول ۳. نتایج آزمون همبستگی پارامترهای مؤثر در عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در شرایط جریان دائمی.

پارامتر	$d_s(m)$	$U(m/s)$	$d_{50}(mm)$	$Y_s(mm)$
$d_s(m)$	-	۰٫۳۸	۰٫۱۵	۰٫۱۸
$U(m/s)$	۰٫۳۸	-	۰٫۴۲	-۰٫۰۱
$d_{50}(mm)$	۰٫۱۵	۰٫۴۲	-	-۰٫۰۲
$Y_s(mm)$	۰٫۱۸	-۰٫۰۱	-۰٫۰۲	-

تکیه‌گاه پل را در شرایط جریان دائمی نشان می‌دهد. کوواریانس منفی به معنی ناهم‌راستایی یا ناسازگاری رابطه‌ی تغییرات دو متغیر است. با توجه به نتایج جدول ۳، مقدار ضریب همبستگی پارامترهای مؤثر در پدیده‌ی آب‌شستگی اندک است. لذا جهت آنالیز قابلیت اطمینان از کلیه‌ی پارامترهای مؤثر استفاده شده است. بدین منظور برای هر پارامتر، یک تابع توزیع در نظر گرفته شده و پارامترها از یکدیگر مستقل فرض شده‌اند. در نظر گرفتن استقلال بین پارامترهای تصادفی منجر به تخمین محافظه‌کارانه‌ی احتمال شکست می‌شود. [۱۶]

احتمال شکست از رابطه‌ی $P_f = N_f/N$ محاسبه می‌شود که در آن، N_f تعداد چرخه‌ی شبیه‌سازی برای دست‌یابی به $g(x) \leq 0$ (شکست سیستم) و N تعداد کل چرخه‌ی شبیه‌سازی است. در پژوهش حاضر، برای تعداد تکرار شبیه‌سازی بزرگ‌تر یا مساوی 10^5 ، $Cov(P_f)$ برای بیشتر روابط مورد استفاده، ثابت و کمتر از ۵٪ محاسبه شد. برای این منظور تعداد تکرارهای ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ ارزیابی شدند. نتایج آنالیزها نشان داد که میانگین عمق آب‌شستگی محاسبه‌شده

در نهایت باید سهم هر عامل ورودی بر عدم قطعیت رابطه‌ی آب‌شستگی تکیه‌گاه پل تعیین شود. آنالیز حساسیت معمولاً برای تعیین حساسیت یک مدل و یا روند خروجی به تغییرات و عدم قطعیت پارامترهای درگیر انجام می‌شود. این آنالیز به منظور تعیین اثر هر یک از متغیرهای تصادفی ورودی در عدم قطعیت آب‌شستگی تکیه‌گاه پل انجام شده است (رابطه‌ی ۱۵). هر چه z کمتر باشد، اثر متغیر تصادفی در اعتمادپذیری کمتر است. مقدار z برای پارامتر بار، مثبت و برای پارامتر مقاومت، منفی است. برای مقادیر $z \leq 0$ ، افزایش z منجر به بهبود اعتمادپذیری و کاهش آن منجر به کاهش اعتمادپذیری می‌شود و برای $z > 0$ ، روند به صورت معکوس است. [۱۵] در رابطه‌ی ۱۵، G خروجی مدل (عمق آب‌شستگی) است.

$$\alpha_z = \frac{\left(\frac{\partial G}{\partial Z}\right)}{\left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial G}{\partial Z}\right)^2\right]^{0.5}} \quad (15)$$

۴. تحلیل نتایج

در پژوهش حاضر از بین روابط مختلف تخمین عمق آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل، روابط لیو و همکاران (۱۹۶۱)، لیو (۱۹۶۱)، لارسن (۱۹۶۳)، نیلسون (۱۹۷۳)، فرولیچ (۱۹۸۹)، ملویل (۱۹۹۲)، ملویل (۱۹۹۷)، لیم (۱۹۹۷) و لیم (۱۹۹۸) و ملویل و کلن (۲۰۰۰) جهت آنالیز قابلیت اطمینان انتخاب شدند. در مبحث عدم قطعیت مسائلی نظیر توزیع پارامترهای مؤثر، مسائل همبستگی بین پارامترها و نوع معادله‌ی سطح شکست فرضی، اهمیت ویژه‌ی دارد. در بررسی پدیده‌ی آب‌شستگی، محاسبه‌ی ارتباط بین پارامترها براساس آزمون‌های همبستگی برای تخمین دقیق قابلیت اطمینان ضروری است. برای محاسبه‌ی همبستگی بین پارامترها، جمع‌آوری داده‌های متنوع و تحلیل آماری بین داده‌ها، اهمیت بسیاری دارد. تعداد داده‌های مورد استفاده، ۱۰۹ داده‌ی حاصل از مطالعات پژوهشی در سال ۱۹۹۵، بوده است. [۲۲] اطلاعات مورد نیاز جهت تعیین ضریب همبستگی پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۳، نتایج آزمون همبستگی پارامترهای مؤثر در تخمین عمق آب‌شستگی

جدول ۴. احتمال شکست، شاخص قابلیت اطمینان و میانگین عمق آب‌شستگی روابط آب‌شستگی تکیه‌گاه پل.

نتایج روش مونت‌کارلو	ملویل و کلمن (۲۰۰۰)	ملویل (۱۹۹۲)	لیم (۱۹۹۷)	لیو (۱۹۶۱)	نیلسون (۱۹۷۳)	فرولیچ (۱۹۸۹)
P_f	۰٫۰۰۱۸	۰٫۳۸۵۳	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۳۶۷۰	۰٫۱۶	۰٫۳۲۱۱
β	۳٫۵۴	-۰٫۲۸۹۲	۵٫۰۰۰۱	-۰٫۰۲۷	۰٫۸۴	-۰٫۱۱۵
N	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
$Y_s(m)$	۰٫۴۳۰۸	۸٫۱۵۸۸	۰٫۷۵۸۴	۴٫۵۰۰۲	۱٫۳۶۳۳	۴٫۰۳۱۰
SF	۲٫۷۸۴۶	۰٫۳۸۳۳	۲٫۱۰۴۴	۰٫۵۵۹۲	۰٫۷۲۳۳	۰٫۴۹۰۷

در تکیه‌گاه با افزایش تعداد تکرار به سمت عدد ثابتی میل می‌کند. با این اوصاف تعداد ۱۰۰۰ داده به‌عنوان نماینده کل داده‌ها در شبیه‌سازی پژوهش حاضر در نظر گرفته شد. در ادامه، شبیه‌سازی طی این مراحل انجام شد: ابتدا برای کلیه روابط مورد اشاره جهت تعیین عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل تمام متغیرهای تصادفی تولید شدند. سپس ویژگی‌های احتمالاتی متغیرها برحسب PDF و CDF آن‌ها به هر یک از متغیرهای ورودی نسبت داده شدند. ضریب تغییرات و تابع توزیع پارامترها به مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در مدل آزمایشگاهی یا اطلاعات میدانی بستگی دارد. در پژوهش حاضر، فضای نمونه‌ی پارامترهای تأثیرگذار در آب‌شستگی از اطلاعات جمع‌آوری‌شده و تجارب پژوهشگران پیشین به‌دست آمد.^[۱۵، ۱۶، ۲۰] جهت تعیین پارامترهای آماری، از قبیل: تابع چگالی احتمال، میانگین و ضریب تغییرات پارامترها از فرضیات پژوهشگران پیشین مطابق با جدول ۱ استفاده شده است. پس از تولید ۱۰۰۰ داده برای هر یک از متغیرهای ورودی، هر یک از روابط ۱۰۰۰ مرتبه محاسبه و در نهایت ۱۰۰۰ عمق آب‌شستگی برای هر رابطه تولید شد. در ادامه، با تولید ۱۰۰۰ داده‌ی تصادفی برای ارتفاع تکیه‌گاه پل، برای هر رابطه ۱۰۰۰ مرتبه تابع عملکرد (Z) محاسبه شد. با محاسبه‌ی نسبت تعداد شکست‌ها (N_f) به تعداد کل داده‌ها (N) که در پژوهش مذکور ۱۰۰۰ تکرار است، احتمال شکست P_f محاسبه شد. شاخص قابلیت اطمینان (β) نیز با استفاده از رابطه‌ی ۹ محاسبه شد. مقادیر P_f و β محاسبه‌شده برای روابط مختلف در جدول ۴ ارائه شده است که در آن، Y_s میانگین عمق آب‌شستگی شبیه‌سازی‌شده و پارامتر SF ضریب ایمنی از نسبت ارتفاع پی تکیه‌گاه پل به میانگین عمق آب‌شستگی به‌دست می‌آید.

نتایج شبیه‌سازی در ارتباط با میانگین عمق آب‌شستگی برای روابط لیو و همکاران (۱۹۶۱)، لارسن (۱۹۶۳)، ملویل (۱۹۹۷) و لیم (۱۹۹۸) به صورت اعداد مختلط به‌دست آمد. لذا از آنجا که بازه‌ی تغییرات پارامترهای مؤثر شامل عمق جریان، سرعت و سایر در محدوده‌ی مطلوب قرار نداشت، در ادامه‌ی شبیه‌سازی‌ها، روابط مذکور کنار گذاشته شدند. لازم به ذکر است که β بهینه‌ترین نقطه در میدان حل و کمترین فاصله به سطح شکست از مرکز در سیستم مختصات Z است. طبق نظر کمیته‌ی امنیت سازه‌ها، شاخص قابلیت اطمینان هر چه به ۳ نزدیک‌تر باشد، سازه پایدارتر و یا پدیده‌ی مورد بررسی معتبرتر است؛ و چنانچه مقدار β بسیار کمتر از ۳ ولی مثبت باشد، بیانگر آن است که اگر چه شکست رخ نداده و تراز استقرار پی بیشتر از عمق آب‌شستگی تخمینی بوده است، با وجود این، اعتمادپذیری در سطح مطلوبی واقع نشده است و به منظور دست‌یابی به شاخص قابل قبول، باید تراز استقرار پی افزایش یابد. هنگامی که شاخص قابلیت اطمینان منفی شود، حالت شکست رخ داده و تراز استقرار پی از عمق آب‌شستگی احتمالی کمتر انتخاب شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده برای روابط لیو (۱۹۶۱)، فرولیچ (۱۹۸۹) و ملویل (۱۹۹۲) حالت شکست رخ داده است. در ارتباط با رابطه‌ی نیلسون (۱۹۷۳)، اگرچه عمق آب‌شستگی بیشتر از تراز استقرار پی به‌دست

نیامده است، منتها اعتمادپذیری در محدوده‌ی مطلوبی قرار ندارد و باید تراز استقرار پی برای رسیدن به اعتمادپذیری مطلوب افزایش یابد. شاخص قابلیت اطمینان (β) با افزایش ضریب تغییرات متغیرهای تصادفی کاهش و با افزایش تراز استقرار پی افزایش می‌یابد. در آنالیز قابلیت اطمینان ممکن است رابطه‌ی، ضریب ایمنی کمتری را به خود اختصاص داده باشد، اما کمترین شاخص قابلیت اطمینان را نداشته باشد و یا رابطه‌ی، بیشترین ضریب ایمنی را به خود اختصاص دهد، اما کمترین شاخص قابلیت اطمینان را داشته باشد. با توجه به نتایج جدول ۴، از بین روابط ذکرشده، شاخص قابلیت اطمینان رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) از شاخص اطمینان رابطه‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰) بیشتر است، منتها ضریب ایمنی رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) از ضریب ایمنی رابطه‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰) کمتر شده است. در توجیه این مطلب می‌توان گفت که رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) اگرچه در محدوده‌ی شکست واقع نشده است، منتها در محدوده‌ی مطلوب شاخص اطمینان نیز واقع نشده است. هرگاه در هیچ‌یک از تکرارهای انجام‌شده مقدار ضریب ایمنی کمتر از ۱ نشود، حالت بحرانی رخ نداده است. از بین روابط موجود، روابط ملویل (۱۹۹۲)، لیو (۱۹۶۱)، فرولیچ (۱۹۸۹) و نیل (۱۹۷۳)، ضرایب ایمنی در شرایط بحرانی دارند و روابط ملویل و کلمن (۲۰۰۰) و لیم (۱۹۹۷) در محدوده‌ی مطلوب ضریب ایمنی قرار دارند. در مجموع روابط لیم (۱۹۹۷) و ملویل و کلمن (۲۰۰۰)، احتمال شکست کمتر و شاخص قابلیت اطمینان و ضریب ایمنی در محدوده‌ی مطلوب‌تری نسبت به سایر روابط دارند. در مطالعه‌ی حاضر، ضریب ایمنی با مقدار ۲٫۱۰۴۴ و با احتمال شکست متقابل ۰٫۰۰۰۱ برای رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) و ضریب ایمنی با مقدار ۲٫۷۸۴۶ و با احتمال شکست متقابل ۰٫۰۰۱۸ برای رابطه‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰) محاسبه شدند. لازم به ذکر است جهت مقایسه‌ی نتایج حاضر با نتایج سایر پژوهشگران، در مطالعات جانسون (۱۹۹۲) ضریب ایمنی با مقدار ۱٫۷۲ برای موردی مشابه با احتمال شکست ۰٫۰۰۰۱ و همچنین در مطالعه‌ی موزامیل (۲۰۰۶)، ضریب ایمنی با مقدار ۱٫۶۷۴ با احتمال شکست متقابل ۰٫۰۰۰۱ برای آب‌شستگی پایه‌ی پل تحت شرایط آب زلال به‌دست آمده است. برای بررسی بهتر قابلیت اطمینان روابط از شاخص بهره‌وری (I) نیز استفاده شد (جدول ۵).^[۱۷] شاخص بهره‌وری از تقسیم شاخص قابلیت اطمینان به درصد خطا به‌دست می‌آید. درصد خطا $RMSE$ از مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی ($Y_s(Sim.)$) با داده‌های واقعی مشاهداتی ($Y_s(Act.)$) به‌دست آمده است. رابطه‌ی دقت و کارایی بیشتری دارد، که شاخص بهره‌وری بالاتری داشته باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_s(Sim.) - Y_s(Act.))^2} \quad (16)$$

براساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۵، بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی توسط رابطه‌ی لیو (۱۹۶۱) و کمینه‌ی عمق آب‌شستگی با استفاده از رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) به‌دست

جدول ۵. مقادیر خطا و شاخص بهره‌وری در روابط مختلف.

روابط	لیو (۱۹۶۱)	نیلسون (۱۹۷۳)	فرولیچ (۱۹۸۹)	ملویل (۱۹۹۲)	لیم (۱۹۹۷)	ملویل و کلن (۲۰۰۰)
Y_s	۲,۴۲۳۷	۰,۷۶۶۷	۱,۶۱۳۹	۲,۱۰۸۳	۰,۲۳۴۷	۰,۲۵۰۲
$RMSE$	۱,۳۷	۰,۹۸	۱,۵۵	۱,۸۵	۰,۱۷	۰,۲۳
$I = \beta / RMSE$	-۰,۱۹	۰,۸۵	-۰,۰۷	-۰,۱۵	۲۱,۷۴	۲۰,۸۲

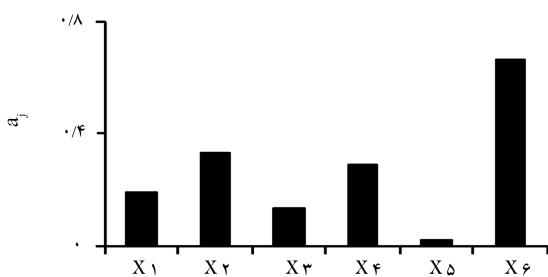
ضریب ایمنی برابر با ۱/۸۱۴۱ خواهد بود. طراحان تکیه‌گاه پل با افزایش ضریب ایمنی که مستقیماً مرتبط با تراز استقرار پی است، می‌توانند سطح ایمنی را محاسبه کنند.

$$SF = 0/3950\beta + 0/6291 \quad (17)$$

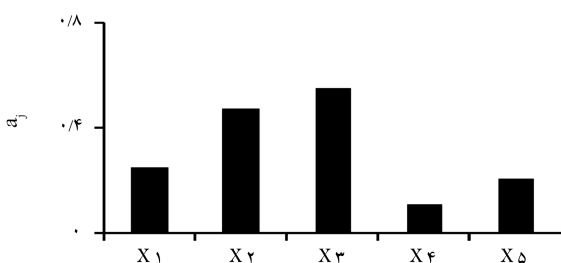
تحلیل رگرسیونی در ارتباط با رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) نیز صورت گرفت و رابطه‌ی ۱۸ به‌منظور برقراری ارتباط بین ضریب ایمنی و شاخص قابلیت اطمینان به‌دست آمد.

$$SF = 0/4174\beta + 0/0157 \quad (18)$$

در ارتباط با رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) به‌منظور رسیدن به شاخص اطمینان مطلوب ($\beta = 3$) براساس رابطه‌ی ۱۸، ضریب ایمنی برابر با ۱/۲۶۷۹ خواهد بود. براساس نتایج این آنالیز پارامترهای SF و β برای رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) نیز به‌عنوان معیارهای امنیت با یکدیگر سازگارند. در پژوهش حاضر، آنالیز حساسیت نیز برای دو رابطه‌ی مورد اشاره انجام شد. نتایج آنالیز ذکرشده برای روابط ملویل و کلن (۲۰۰۰) و لیم (۱۹۹۷) در شکل‌های (۲الف) و (۲ب) ارائه شده است. محور افقی شکل (۲الف) پارامترهای تصادفی مؤثر شامل X_1 عامل زاویه‌ی جریان، X_2 متوسط اندازه‌ی رسوب، X_3 عرض تکیه‌گاه پل، X_4 پارامتر عمق جریان، X_5 عامل شکل تکیه‌گاه و X_6 سرعت و محور عمودی عامل حساسیت است. در آنالیز حساسیت روابط



الف) رابطه‌ی ملویل و کلن (۲۰۰۰)

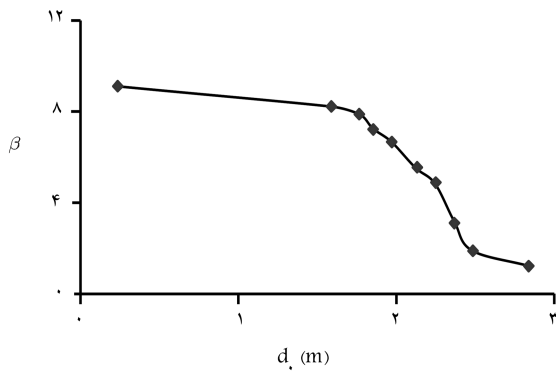


ب) رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷)

شکل ۲. نمودار آنالیز حساسیت انجام شده.

آمده است. کمینه‌ی خطا مربوط به روش لیم (۱۹۹۷) و بیشینه‌ی شاخص بهره‌وری و کمترین پراکندگی نیز مربوط به همان رابطه است. رابطه‌ی ملویل و کلن (۲۰۰۰) نیز از دو جنبه‌ی کمینه‌ی خطا و بیشینه‌ی شاخص بهره‌وری در رتبه‌ی دوم قرار دارد. با توجه به تحلیل آماری قابلیت اطمینان انجام‌گرفته، از میان روابطی که در پژوهش حاضر ارزیابی شده‌اند، رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) و ملویل و کلن (۲۰۰۰) مطمئن‌ترین روابط به‌منظور پیش‌بینی عمق آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل‌ها هستند. از این رو در مرحله‌ی بعدی پژوهش به بررسی رابطه‌ی بین ضریب ایمنی (SF) و شاخص قابلیت اطمینان (β) و آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در دو رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) و ملویل و کلن (۲۰۰۰) پرداخته شده است.

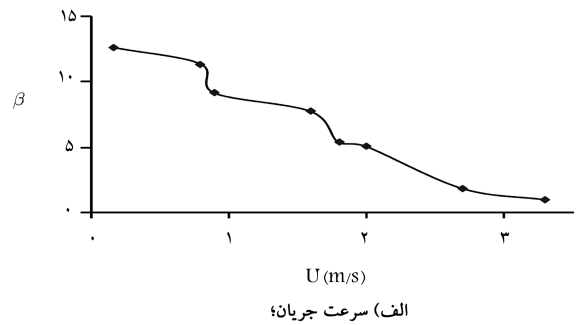
با توجه به اینکه روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان برای بررسی ریسک و اعتمادپذیری سیستم‌های هیدرولیکی به‌ویژه آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل‌ها مناسب هستند، می‌توان ارتباط آن‌ها را با روش سنتی تعیین ضریب ایمنی (SF) نیز بررسی کرد. مهندسان معمولاً در طراحی‌ها به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها از ضریب ایمنی استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است که استفاده از ضریب ایمنی فقط اثر عدم قطعیت پارامترها را کاهش می‌دهد و مشخص نمی‌کند که سیستم در چه سطح ایمنی قرار دارد. به منظور افزایش کارایی سیستم، بررسی ارتباط بین ضریب ایمنی و شاخص قابلیت اطمینان ضروری به‌نظر می‌رسد. لازم به ذکر است که رابطه‌ی مذکور، شاخص معتبری جهت طراحی ایمن تکیه‌گاه پل‌ها خواهد بود. ضریب ایمنی (SF) به‌صورت نسبت d_a/Y_s تعریف می‌شود. در سیستم‌های طبیعی نظیر پدیده‌ی آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل، بار، سرعت، و عمق جریان در رودخانه است که با توجه به شرایط محیطی تغییر می‌کنند و تغییر آن‌ها کمتر در اختیار بشر است. ولی مقاومت (عمق پی تکیه‌گاه پل) به راحتی قابل تغییر است. برای رسیدن به مقدار مشخصی از ضریب ایمنی با ثابت بودن بار، مقدار مقاومت سیستم را می‌توان به‌دست آورد. ضریب ایمنی (SF) مطرح‌شده در پژوهش حاضر در قالب کلی پیشنهاد نمی‌شود. زیرا مسئله‌ی هزینه و اقتصاد طرح و تبعات شکست در آن قید نشده است. با توجه به تحلیل قابلیت اطمینان تکیه‌گاه پل ارائه‌شده و محاسبه‌ی ضریب ایمنی، ارتباطی خطی بین دو پارامتر مذکور به‌دست می‌آید. در مطالعه‌ی حاضر، برای رابطه‌ی ملویل و کلن (۲۰۰۰) و لیم (۱۹۹۷)، ضریب ایمنی‌های متنوع براساس شاخص قابلیت اطمینان با انجام آنالیز اعتمادپذیری محاسبه شد. ۱۰۰۰ شبیه‌سازی شده به ۵ دسته تقسیم‌بندی شدند و برای هر دسته، ضریب ایمنی در مقابل شاخص اعتمادپذیری پلات شد و بهترین روابط با انجام آنالیز رگرسیونی بین SF و β به‌دست آمد. SF و β به‌عنوان معیارهای امنیت با یکدیگر سازگار هستند. با افزایش ضریب ایمنی (SF) احتمال شکست کاهش و شاخص β افزایش می‌یابد. با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده و تحلیل رگرسیونی، رابطه‌ی ۱۷ برای تبدیل شاخص قابلیت اطمینان به ضریب ایمنی در تکیه‌گاه پل برای رابطه‌ی ملویل و کلن (۲۰۰۰) ارائه شد. برای رسیدن به شاخص اطمینان مطلوب ($\beta = 3$) از رابطه‌ی ۱۷



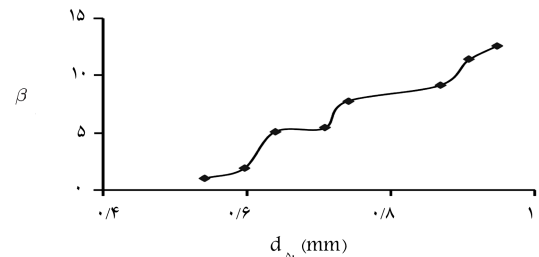
شکل ۴. تأثیر عمق جریان در شاخص قابلیت اطمینان در رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷).

جدول ۶. مشخصات هیدرولیکی مربوط به مثال کاربردی.

$Q (m^3/s)$	$d_o (m)$	$U (m/s)$	$U_c (m/s)$	F_r
۱۲۱٫۴۵	۲٫۱۵۶	۱٫۴۰۸	۲٫۳۰۶	۰٫۳۰۶
۲۳۰٫۴۳	۳٫۲۲۶	۱٫۷۸۶	۲٫۴۵۷	۰٫۳۱۷
۳۸۸٫۵۳	۴٫۵۱۰	۲٫۱۵۴	۲٫۵۸۲	۰٫۳۲۴



الف) سرعت جریان؛



ب) متوسط اندازه‌ی رسوبات در رابطه‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰).

شکل ۳. ارتباط بین شاخص قابلیت اطمینان (β).

(۱۹۹۵) مقایسه شد. [۲۴] بدین منظور مقادیر ضرایب همبستگی بین دو دسته داده و توابع خطای نتایج محاسباتی ($RMSE$ و $NRMSE$) محاسبه شدند. براین اساس مقادیر $R^2 = ۰٫۸۹۴$ ، $RMSE = ۰٫۳۷۲$ و $NRMSE = ۰٫۲۸۶$ به دست آمدند. با توجه به اینکه اطلاعات میدانی مورد اشاره در شبیه‌سازی انجام شده وارد نشده‌اند، به نظر می‌رسد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی مذکور، دقت قابل قبولی دارند.

۵. مثال کاربردی

در انتها به ذکر یک مثال کاربردی و تحلیل نتایج حاصل از پژوهش برای این مورد پرداخته شده است. مشخصات تکیه‌گاه پل، به‌خصوص تراز استقرار پی به عوامل هیدرولیکی و مشخصه‌های جریان و میزان عمق آب‌شستگی اطراف پایه وابسته است.

رودخانه‌یی با عرض ۴۰ متر و شیب طولی ۰٫۰۱ پوشیده از مصالح با قطر متوسط ۲۵ میلی‌متر و ضریب زبری مایننگ ۰٫۳۵ در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات هیدرولیکی جریان مطابق با اطلاعات ارائه شده در مرجع [۱۴] آمده است که خلاصه‌ی اطلاعات مذکور در جدول ۶ نمایش داده شده است. براساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۶، آب‌شستگی آب زلال رخ داده است. جزئیات محاسبات قابلیت اطمینان در جدول ۷ ارائه شده است. در این محاسبات تراز استقرار پی به‌عنوان پارامتر هدف در نظر گرفته شده و بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی با استفاده از رابطه‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰)، ضریب اطمینان و شاخص اطمینان محاسبه شده‌اند.

ملاحظه می‌شود که با افزایش دبی، ضریب اطمینان کاهش می‌یابد. و برای دبی بیشینه، تراز استقرار پی کمتر از ۳ متر ضریب ایمنی را به‌شدت کاهش می‌دهد. در هر حال به ازاء همه‌ی دبی‌های مورد بررسی، شرایط مطلوب به ازاء تراز استقرار پی ۴ متر و بیشتر به‌دست می‌آید.

آب‌شستگی تکیه‌گاه پل، فقط تراز استقرار پی تکیه‌گاه پل، عامل مقاومتی است که منفی است و سایر پارامترها، بار وارد بر سیستم و مقادیری مثبت هستند.

با توجه به شکل (۲الف) پارامتر سرعت جریان، بیشترین تأثیر در عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل و عامل شکل تکیه‌گاه، کمترین تأثیر در خروجی رابطه‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰) است. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که در رابطه‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰)، سهم سرعت حدود ۶۶٫۸٪ و سهم عامل شکل تکیه‌گاه حدود ۲٫۱٪ است. در شکل (۲ب)، پارامترهای مربوط به محور افقی X_1 عامل شکل تکیه‌گاه، X_2 سرعت، X_3 عمق جریان، X_4 پارامتر شیلدز، X_5 متوسط اندازه‌ی رسوبات، و محور عمودی عامل حساسیت است. با توجه به شکل (۲ب) پارامتر عمق جریان و سرعت به ترتیب بیشترین اثر و پارامتر شیلدز، کمترین اثر در خروجی‌های حاصل از رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) هستند. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که در رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) سهم عمق جریان حدود ۵۵٪ و سهم پارامتر شیلدز حدود ۱۱٪ است.

با توجه به اینکه جریان از نوع آب زلال است، عمق آب‌شستگی متناسب با سرعت جریان است و برای معادله‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰)، طبق شکل (۳الف) شاخص β با افزایش سرعت کاهش می‌یابد، تا زمانی که به سرعت بحرانی برسد و ثابت شود که: $\beta = ۱٫۸۷ - ۱٫۰۱$ در شکل (۳ب)، اثر تغییرات متوسط اندازه‌ی رسوبات در شاخص اطمینان نشان داده شده است. با افزایش اندازه‌ی رسوبات، افزایش شاخص β با آهنگ سریع‌تری صورت می‌گیرد. در نتیجه این پارامتر در β تأثیرگذار است. ملاحظه شد که با تعیین عامل حساسیت برای پارامترهای رابطه‌ی ملویل و کلمن (۲۰۰۰) پس از سرعت، متوسط اندازه‌ی رسوب در مرتبه‌ی دوم اهمیت قرار دارد. تأثیر اندازه‌ی متوسط رسوبات در شاخص اطمینان، مؤید اثر پارامتر مذکور در عامل آنالیز حساسیت است. شکل ۴، سازگاری عامل حساسیت و نحوه‌ی تأثیر عمق جریان در شاخص اطمینان در رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که این پارامتر با آهنگ سریعی در شاخص قابلیت اطمینان تأثیر می‌گذارد. در ادامه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر با نتایج مطالعات میدانی کارلسون و همکاران

جدول ۷. جزئیات محاسبات قابلیت اطمینان در مورد مثال کاربردی.

$Q (m^3/s)$	$Y_s (m)$	$d_a (m)$	β	SF
		۲	۳,۱۲۲	۱,۸۶۲
۱۲۱,۴۵	۱,۰۷۴	۳	۵,۴۷۹	۲,۷۹۳
		۴	۷,۸۳۶	۳,۷۲۴
		۲	۱,۱۵۵	۱,۰۸۵
۲۳۰,۴۳	۱,۸۴۳	۳	۲,۵۲۸	۱,۶۲۸
		۴	۳,۹۰۲	۲,۱۷۰
		۲	۰,۳۱۰	۰,۷۵۲
۳۸۸,۵۳	۲,۶۶۱	۳	۱,۲۶۲	۱,۱۲۷
		۴	۲,۲۱۳	۱,۵۰۳

۶. نتیجه‌گیری

به‌کارگیری تحلیل‌های قابلیت اطمینان در مسئله‌ی آب‌شستگی تکیه‌گاه پل با توجه به نقش حیاتی پل‌ها و وقوع همیشگی آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در اغلب مطالعات انجام‌شده در پدیده‌ی آب‌شستگی، عدم قطعیت پارامترها بررسی نشده و به موجب آن، ریسک نیز در پیش‌بینی مقدار آب‌شستگی

مشخص نشده است. در پژوهش حاضر، با تولید ۱۰۰۰ عدد تصادفی به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و حل تابع سطح شکست برای ۱۰۰۰ بار تکرار، احتمال شکست روابط آب‌شستگی تکیه‌گاه پل تحت شرایط آب زلال محاسبه شده است. برای این منظور به بررسی قابلیت اطمینان روابط آب‌شستگی تکیه‌گاه پل تحت جریان دائمی در شرایط آب‌شستگی آب زلال به‌وسیله‌ی روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو پرداخته شد. براساس نتایج به‌دست آمده، در میان روابط مختلف موجود، روابط لیم (۱۹۹۷) و ملویل و کلن (۲۰۰۰)، کمترین احتمال شکست و بیشترین میزان شاخص قابلیت اطمینان را دارند. برای روابط لیو (۱۹۶۱)، فرولیچ (۱۹۸۹) و ملویل (۱۹۹۲) حالت شکست رخ می‌دهد. برای رابطه‌ی نیلسون (۱۹۷۳) اگرچه عمق آب‌شستگی بیشتر از تراز استقرار پی نبوده است، اعتمادپذیری در محدوده‌ی مطلوب واقع نیست. تحلیل رگرسیونی برای رابطه‌ی ملویل و کلن (۲۰۰۰) و رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) صورت گرفت و ارتباط بین ضریب ایمنی و شاخص قابلیت اطمینان به‌دست آمد. نتایج حاکی از آن است که پارامتر ضریب ایمنی و شاخص قابلیت اطمینان برای هر دو رابطه‌ی ملویل و کلن (۲۰۰۰) و لیم (۱۹۹۷) با یکدیگر سازگار هستند. بیشترین میزان شاخص بهره‌وری مربوط به رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) و کمترین آن مربوط به رابطه‌ی لیو (۱۹۶۱) است. با انجام آنالیز حساسیت برای رابطه‌ی لیم (۱۹۹۷) مشخص شد که پارامتر عمق جریان بیشترین تأثیر و پارامتر شیلدز کمترین تأثیر را دارند و در رابطه‌ی ملویل و کلن (۲۰۰۰)، پارامتر سرعت بیشترین تأثیر و پارامتر عامل شکل تکیه‌گاه، کمترین تأثیر را دارند.

پانوشته‌ها

1. congruential method
2. seed
3. acceptance-rejection method
4. hit and miss method

منابع (References)

1. Hosseini, H., Hatef, N. and Taleb-Bidokhti, N. "Three-dimensional simulation of scour around the bridge abutments of vertical wall using FLOW-3D software", *Sharif J. Civil Eng.*, **30-2**(2), pp. 117-122 (2104).
2. Maherani, M. "Effects of armor layer on scouring around the bridge abutments", MSc Thesis, Dept. Agri. Eng., Isfahan Univ. Tech. (2008).
3. Dongol, D.M.S. "Local scour at bridge abutment", School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand, Rep. No. 544 (1994).
4. Ahmad, F. and Rajartnam, N. "Observation on flow around bridge abutment", *J. Mech. Res.*, **126**(1), pp. 5-51 (2000).
5. Barbhuiya, A.K. and Dey, S. "Local scour at abutments", *J. Hydraul. Eng.*, **29**(5), pp. 449-476 (2004).
6. Ghavasieh, A. and Norouzi, A. "Review on the aspects of reliability and risk analysis", Tech. Workshop Coexistence with floods, Power Water Univ. Tech. (2006).
7. Kreuzer, H. and Bury, K.V. "Reliability analysis of Mohr failure criterion", *J. Eng. Mec.*, **115**(3), pp. 447-464 (1989).
8. Tarek, Z. and Minchin, E. "Physical model for risk assessment of bridge with unknown foundation", *J. Perform. Cons. Facilities*, **21**(1), pp. 44-52 (2007).
9. Farhangi, M. and Bozorg-Haddad, A. "Evaluation of the effects of the release changes on reliability of reservoir systems using Monte Carlo simulation", *1st National Conf. Eng. Manag. Infrastructures*, Tehran Univ. (2009).
10. Gjunsburgs, B., Neilands, R., Bardins, A. and et al. "Flood damage risk assessment for hydraulic structures in river floodplain", Int. Symp. Water Manag. Hydraul. Eng., Riga Technical University, Latvia, pp. 47-57 (2009).
11. Yanmaz, M. and Apaydin, M. "Bridge scour risk assessment and countermeasure design", *J. Perform. Cons. Facilities*, **26**(4), pp. 449-506 (2012).
12. Etema, R., Nakato, T. and Muste, M. "An overview of scour types and scour estimation difficulties faced at bridge abutment", Proc. 2003 Mid-Continent Transport. Res. Symp., Ames, Iowa (2003).

13. Yanmaz, A.M. and Celebi, T. "A reliability model for bridge abutment scour", *Turkish J. Eng. Environ. Sci.*, **28**(1), pp. 67-83 (2004).
14. Yanmaz, A.M. "Uncertainty of local scouring parameters around bridge piers", *Turkish J. Eng. Environ. Sci.*, **25**(1), pp. 127-137 (2001).
15. Muzzammil, M., Siddiqui, N.A. and Siddiqui, A.F. "Reliability considerations in bridge pier scouring", *J. Struc. Eng. Mech.*, **28**(1), pp. 1-18 (2006).
16. Salamatian, A. "Scour around the bridge piers close to the natural conditions and reliability analysis", PhD Thesis, Dept. Civil Env. Eng., Amir Kabir Univ. Tech. (2013).
17. Tung, Y.K., *Uncertainty and Reliability Analysis*, Chap.7 in *Water Resources Handbook*, (Edi. By Mays L.W.) McGraw-Hill, New York (1998).
18. Chang, C., Tung, Y. and Yang, J. "Monte Carlo simulation for correlated variables with marginal distribution", *J. Hydraul Eng.*, **120**(3), pp. 313-331 (1994).
19. Melville, B.W. and Coleman, S.E., *Bridge Scour*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado (2000).
20. Johnson, P.A. and Dock, D.A. "Probabilistic bridge scour estimates", *J. Hydraul. Eng.*, **124**(7), pp. 750-755 (1998).
21. Ayyub, B.M. and Halder, A. "Decisions in construction operation", *J. Construc. Eng. Manag. Div.*, **111**(4), pp. 343-357 (1998).
22. Melville, B.W., Coleman, S.E. and Lauchlan, C.S. "Clear water scour development at bridge abutment", *J. Hydraul. Res.*, **41**(5), pp. 521-531 (2003).
23. Carlson, R.F., Scarbrough, G. and Harping, J. "Field and laboratory investigation of bridge abutment", Report No. INE/TRC 94.21, SPR-UAF-92-2, Department of Civil Eng., University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska (1995).