

بررسی عددی اثر فاصله‌ی پایه‌های پل بر پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی جریان‌های رودخانه‌یی با استفاده از نرم‌افزار BRI-STARS

یوسف حسن‌زاده (استاد)

گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

نازیلا کاردان* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

پاشا کاظمی (کارشناس ارشد)

شیوا عیاری (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۷۱-۸۵)
دوری ۲-۳، شماره ۱/۴، ص. ۷۱-۸۵

آب‌شناسی پایه‌های پل یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده‌ی پایداری پل‌های احداث شده بر روی رودخانه‌هاست. مطالعات زیادی جهت تخمین عمق و شدت آب‌شناسی اطراف پایه‌های پل انجام پذیرفته است. به دلیل پیچیدگی پدیده‌ی مذکور، بسیاری از روابط موجود قادر نیستند عمق آب‌شناسی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند. با توجه به اهمیت مسئله‌ی آب‌شناسی در طراحی پل‌ها، در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار BRI-STARS^۱، ضمن مقایسه‌ی روابط تخمین عمق آب‌شناسی، نتایج و داده‌های خروجی حاصل از تحلیل مدل‌های مختلف با نسبت فاصله به عرض پایه‌های متفاوت بررسی شده است. مقایسه‌ی دو رابطه‌ی فروهلیچ و CSU نشان داده است که معادله‌ی فروهلیچ، مقدار آب‌شناسی را حدود ۱۱٪ بیشتر از CSU تخمین زده و به لحاظ طراحی محافظه‌کارانه‌تر است. به هنگام استفاده از فرمول CSU، میزان افزایش عمق آب‌شناسی در مدل‌های با نسبت $x/b < 7$ و در فرمول فروهلیچ برای نسبت‌های $x/b < 8/5$ قابل صرف نظر کردن است. به منظور انتخاب موقعیت بهینه برای قرارگیری پل، به لحاظ شرایط آب‌شناسی، پارامترهای هیدرولیکی تغییرات سطح آزاد آب، عدد فرود، سرعت متوسط جریان، و نیز تغییرات تراز بستر تحت اثر نحوه‌ی استقرار پایه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت، با برآش اطلاعات خروجی، بهترین و مناسب‌ترین نمودار کاربردی به همراه معادله‌ی افزایش عمق آب‌شناسی برای فواصل مختلف عرض پایه‌ها ارائه شده است. همچنین ثابت شده است که عمق نسبی جریان در محدوده‌ی $3/2 < y/b$ در آب‌شناسی مؤثر است و با کاهش فاصله‌ی پایه‌ها، محدوده‌ی اثر عمق نسبی به $2/75 < y/b$ می‌رسد.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی عددی، آب‌شناسی، پایه‌های پل، مجاری جریان، نرم‌افزار BRI-STARS.

۱. مقدمه

برخورد جریان به پایه و جداسدن جریان از پایه‌ی پل، دو عامل اصلی در ایجاد آب‌شناسی در پیرامون پایه هستند. برخورد جریان به پایه، گردابه‌ی نعل اسبی را شکل می‌دهد و جدایش جریان از پایه، گردابه‌های دنباله‌یی را پدید می‌آورد. در ارتباط با آب‌شناسی موضعی، که جزئی از آب‌شناسی کلی است، مطالعات متعددی توسط پژوهشگران مختلف انجام پذیرفته است، که از پیشگامان آن‌ها می‌توان به لارسن (۱۹۵۸) اشاره کرد، که برای اولین بار عوامل اساسی در آب‌شناسی موضعی را مورد بررسی قرار داد و معتقد بود که عدم تعادل بین ظرفیت حمل رسوب با مقدار

آب‌شناسی پدیده‌یی است که در اثر فرسایش بستر توسط جریان آب و حمل مواد بستر توسط نیرویی که این جریان به مواد بستر وارد می‌کند، به وجود می‌آید. مکانیسم این پدیده به گونه‌یی است که قبل از خرابی سازه در اثر نیروهای مخرب سیل، فرسایش اطراف پی ناشی از تأثیر جریان، موجب آسیب سازه‌ی پل می‌شود. به‌طور کلی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۰/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۲۰، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۲۷.

yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir
n.kardan@azaruniv.ac.ir
kazemi@yahoo.com
ayyarishiva@yahoo.com

رسوبات حمل شده منجر به آب‌سستگی خواهد شد و تا زمانی که توازن بین این دو برقرار نشود، حالت تعادل به وقوع نمی‌پیوندد.^[۱] بعدها نیز پژوهشگران دیگری،^[۲-۵] مطالعاتی بر روی عوامل مؤثر در آب‌سستگی موضعی انجام دادند. تخمین عمق آب‌سستگی پایه‌های پل، پارامتر مهمی در طراحی پل هاست، زیرا عدم توجه به آن ممکن است باعث تخریب و یا کاهش عمر پل شود.^[۶] لیکن از سویی دیگر، به دلیل پیچیدگی پدیده‌ی مذکور، بسیاری از روابط موجود قادر نیستند عمق آب‌سستگی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند.^[۷]

از فرمول‌های مهم و معتبر برای محاسبه‌ی تغییرات عمق آب‌سستگی می‌توان به فرمول‌های دانشگاه کلرادو، فروهلیچ، و بروسرز اشاره کرد.^[۸] همچنین در پژوهشی در سال ۱۹۹۵، طی مطالعات گسترده‌ی، رابطه‌های ۷ دانشگاه کلرادو (۱۹۹۳)، آکلند، لارسن و تاج (۱۹۷۲)، شن (۱۹۶۹)، جین و فیشر (۱۹۸۱)، بروسرز (۱۹۶۵)، و هانکورا (۱۹۷۱) با تعداد زیادی داده‌های میدانی مقایسه و محدوده‌ی کاربرد هر کدام از معادلات مشخص شده است.^[۹]

از مهم‌ترین عوامل مؤثر در شدت آب‌سستگی می‌توان به خصوصیات جریان، شکل آبراه، مشخصات پایه‌ها، و خصوصیات رسوب اشاره کرد.^[۱۰] در این بین، عامل فاصله‌گذاری بین پایه‌ها از جمله عواملی است که مطالعات چندانی روی آن انجام نشده است. عامل مذکور در سال ۱۹۸۵ برای اولین بار در عمق ثابت و سرعت‌های مختلف جریان مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۱] برخی پژوهشگران در مطالعات خود با تعریف و افزودن عامل تصحیحی به فرمول بروسرز (۱۹۶۵)،^[۱۰] به نتایج درخور توجهی دست پیدا کرده‌اند. ایشان نشان داده‌اند هرگاه فاصله‌ی بین پایه‌ها از ۷ برابر عرض پایه بیشتر باشد، گروه پایه‌ها رفتاری شبیه تک‌پایه خواهد داشت. به عبارتی، در فاصله‌ی مذکور تأثیر پایه‌ها در یکدیگر حذف می‌شود. ایشان همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که پدیده‌ی آب‌سستگی به شدت تحت تأثیر دو عامل تداخل گردابه‌های برخاستگی پیرامون پایه‌ها و همچنین افزایش سرعت جریان بین پایه‌ها (و تشدید تنش برشی) در اثر تنگ‌شدگی مسیر قرار دارد.^[۱۲] در پژوهش دیگری در سال ۱۹۸۵، تأثیر فاصله‌ی پایه‌ها در دو جهت عرضی و طولی کانال، در شرایط جریان زیر بحرانی مورد مطالعه قرار گرفته و در آن به بررسی تأثیر اندرکنش بین پایه‌ها در توزیع فشار، توزیع نیرو، و نوسان گردابه‌های پیرامون پایه‌ها پرداخته شده است. نتایج نشان داده است که به ازاء نسبت فاصله به عرض پایه‌ی بزرگ‌تر از مقدار ۱/۸، گردابه‌های پیرامون هر پایه تأثیری در انتشار گردابه‌های پایه‌ی مجاور نخواهد داشت.^[۱۱]

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۰، گسترش آب‌سستگی پیرامون جفت‌پایه به صورت تجربی بررسی و آزمایش‌ها در شرایط جریان دائمی، یکنواخت و بدون انتقال رسوب بوده و شدت جریان ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش تغییرات زمانی فرسایش بستر، ناحیه‌ی گسترده‌ی فرسایش، تجمع رسوبات در اطراف پایه‌ها، و ویژگی‌های حفره‌ی آب‌سستگی بررسی شده و نتایج نشان داده است که با کاهش فاصله‌ی پایه‌ها، آب‌سستگی تا حدوی افزایش می‌یابد، طوری که ممکن است موجب گسیختگی پل شود.^[۱۳] برخی پژوهشگران نیز در پژوهشی در سال ۲۰۱۳ تأثیر فاصله‌ی پایه‌ها، تعداد پایه‌ها، زاویه‌ی برخورد جریان، و مدت زمان آزمایش‌ها را در الگوی آب‌سستگی و عمق آب‌سستگی تعادلی مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و با شدت جریان نزدیک به ۱ انجام شده و تا ۷۵ ساعت ادامه یافته‌اند. تعداد پایه‌ها ۱، ۲، ۳ و ۴ بوده و فاصله‌ی آن‌ها ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ برابر قطر پایه‌ها در نظر گرفته شده است. در نهایت، دو رابطه‌ی کلی برای پیش‌بینی آب‌سستگی در اطراف گروه پایه‌ها پیشنهاد شده است.^[۱۳]

در پژوهشی دیگر (۲۰۱۳)، به بررسی آب‌سستگی و الگوی جریان اطراف تک‌پایه و جفت‌پایه پرداخته شده است. پژوهش مذکور به صورت تجربی بوده و آزمایش‌ها در

شرایط آب زلال انجام یافته‌اند. پارامترهای متغیر در آزمایش‌ها، عمق جریان، قطر پایه، و فاصله‌ی پایه‌ها بوده است. نتایج نشان می‌دهد که اندازه و گستردگی حفره‌ی آب‌سستگی مستقیماً به اندازه‌ی پایه و فاصله‌ی پایه‌ها بستگی دارد، به گونه‌ی که با افزایش فاصله‌ی پایه‌ها از شدت آب‌سستگی کاسته و اندازه‌ی آن به فرسایش اطراف تک‌پایه نزدیک می‌شود. به عبارتی دیگر، پایه‌ی مجاور هر پایه مانند یک مانع عمل می‌کند و اغتشاشات الگوی جریان را افزایش می‌دهد.^[۱۴]

در برخی موارد به دلایل اقتصادی یا ژئوتکنیکی استفاده از گروه پایه یا پایه‌های مرکب اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا، براساس نتایج آزمایشگاهی و با استفاده از معادله‌ی کوته‌ری (۲۰۰۷)، معادله‌ی جدیدی برای محاسبه‌ی فرسایش بستر در حالت جفت پایه با افزودن عامل فاصله بین پایه‌ها بسط یافته است. نتایج آزمایش‌های مذکور نشان می‌دهد هرگاه نسبت فاصله‌ی پایه‌ها به عرض آن‌ها از مقدار ۶ بزرگ‌تر باشد، فرسایش بستر جفت‌پایه برابر با فرسایش بستر حالت تک‌پایه خواهد شد.^[۱۵]

برخی پژوهشگران (۲۰۰۶)، نیز با استفاده از نرم‌افزار BRI-STARS، آب‌سستگی اطراف پایه‌های پل را با داده‌های میدانی موجود مقایسه کرده‌اند. پایه‌های پل انتخابی در ۳ گروه رودخانه‌ی با بسترهای مختلف انتخاب شده و به این نتیجه دست یافته‌اند که آب‌سستگی محاسباتی بیش از عمق آب‌سستگی مشاهداتی است.^[۱۶]

همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۱)، به مطالعه و بررسی دقت تخمین عمق آب‌سستگی پرداخته شده و نرم‌افزار BRI-STARS برای بررسی آب‌سستگی پایه‌ی پل‌ها در چند رودخانه‌ی اصلی ایران به کار برده شده است. داده‌های مذکور به ۳ دسته تقسیم شده‌اند: پل‌هایی که در بسترهای ریزدانه (رس و سیلت) واقع شده‌اند، پل‌هایی که در بستر ماسه‌ی واقع شده‌اند، و نهایتاً پل‌هایی که در رودخانه‌های با بستر شنی و قله‌سنگ واقع شده‌اند. در نهایت، آب‌سستگی اطراف پایه‌ی پل‌ها پیش‌بینی شده است. پل‌های مذکور عبارت‌اند از: پل غدیر بر روی رودخانه‌ی زاینده‌رود، پل خان بر روی رودخانه‌ی گر، و پل چم سهراب‌خانی بر روی رودخانه‌ی گر.^[۱۷]

مطالعات انجام‌یافته در زمینه‌ی آب‌سستگی پیرامون تک‌پایه بسیار زیاد است، لیکن پژوهش‌های بسیار اندکی در زمینه‌ی تأثیر پایه‌های مجاور انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار BRI-STARS، دو رابطه‌ی تخمین عمق آب‌سستگی،^[۱۸، ۱۹] انتخاب شده و با بررسی نتایج و داده‌های خروجی حاصل از تحلیل مدل‌های مختلف با نسبت فاصله به عرض پایه‌های متفاوت، علاوه بر انتخاب مقطع و موقعیت بهینه‌ی پل به لحاظ شرایط آب‌سستگی، شدت آب‌سستگی موضعی در اثر نحوه‌ی استقرار پایه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار BRI-STARS

در این پژوهش شبیه‌سازی عددی با استفاده از BRI-STARS، که یک مدل دو بُعدی آب و مسیریابی رسوب به همراه رابط گرافیکی است، انجام شده است. این مدل جهت تحلیل مسائل مهندسی رودخانه‌ها با داده‌ها و منابع محدود به‌کار می‌رود. مدل BRI-STARS قابلیت محاسبه‌ی فرسایش و یا تجمع رسوبات را برای جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی، و یا ترکیبی از هر دو شکل جریان، که شامل جهش‌های هیدرولیکی نیز است، دارد. برخلاف مدل‌های مرسوم در مسیریابی رسوب، این مدل همچنین توانایی شبیه‌سازی پدیده‌ی عریض‌شدن یا تنگ‌شدن کانال (تغییرات عرض انسداد) و نیز فرسایش موضعی را دارد. این نرم‌افزار براساس مفاهیم لوله‌ی جریان و نیز تئوری قدرت جریان کمینه، از معادلات انرژی، انتقال رسوب و مومنت استفاده و

۳ است:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + n \frac{\partial Ad}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial t} - q_{side} = 0 \quad (3)$$

که در آن، Q_s دبی حجمی رسوبات، Ad حجم رسوبات جمع شده برای واحد طول، q_s حجم رسوبات معلق در مقطع عرضی کانال در واحد طول، q_{side} جریان ورودی رسوبات جانبی، و n حجم رسوبات در حجم واحد لایه بستر، که به صورت معمول برابر ۰/۶^۸ مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار بار رسوبی همواره ثابت است و نسبت به زمان بدون تغییر باقی می‌ماند (رابطه ی ۴):^[۸]

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} = \frac{dQ_s}{dx}, \quad \frac{\partial q_s}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

نهایتاً معادله ی پیوستگی رسوب به صورت رابطه ی ۵ در می‌آید:

$$\frac{dQ_s}{dx} + n \frac{\partial Ad}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

در پایان محاسبات هر ۴ مرحله، ترکیب مواد بستر بازمینی و تغییرات نهایی بستر کانال محاسبه می‌شود. روش جوشن بندی نیز در محاسبات مسیریابی رسوب دخیل می‌شود. لازم به یادآوری است که محاسبات در طول زمان از طریق گراف‌های تخلیه ی آب و رسوب ادامه می‌یابند.^[۸]

۲.۲. مورد مطالعاتی

برای بررسی تأثیر فاصله ی پایه ی پل‌ها در شدت آب‌سستگی، پل ۱۵ کالیفرنیا انتخاب شده است. این پل در محدوده ی لوس کاتوس کریک^۵ و در پایین دست آن واقع شده است. طی سیلاب ۱۱ مارس سال ۱۹۹۵، آب‌سستگی شدیدی در محل مطالعاتی مذکور به وقوع پیوسته است.^[۸] در این پژوهش عمق آب‌سستگی و سایر پارامترهای هیدرولیکی در محل مقاطع پیش‌بینی شده برای محدوده ی پل بررسی و سعی شده است تا با اضافه کردن پایه‌های فرضی برای پل مذکور، در مقاطع از پیش تعیین شده، تأثیر فاصله ی پایه‌ها در شدت آب‌سستگی اطراف آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۲، پلان محدوده ی مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. موقعیت قرارگیری مقاطع عرضی ۸ گانه به وضوح در شکل قابل مشاهده است. این مقاطع در ۱۹۹۵ توسط مؤسسه ی USGS^۶ اندازه‌گیری شده‌اند. مقاطع شماره ی ۶، ۷، ۸ و ۹ در بالادست محل پل و ۴ مقطع عرضی ۳، ۲، ۱-۵ و ۱ در پایین دست محل احداث پل هستند. به عنوان نمونه، مقطع عرضی شماره ی ۹ در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه در محل احداث پل، مقطع عرضی وجود ندارد، دو مقطع عرضی جدید در محل احداث پل در نظر گرفته شده است. به منظور افزایش دقت در شبیه‌سازی نرم‌افزاری، تعداد ۱۱ مقطع عرضی دیگر به مقاطع موجود افزوده شده است. لذا در مجموع تعداد مقاطع عرضی به ۲۱ عدد افزایش یافته است.

شکل ۴، نمایی جدید از پلان محدوده ی مطالعاتی است، که موقعیت مقاطع عرضی مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در پلان مزبور، دو نوع شماره‌بندی برای مقاطع موجود است، که شماره‌بندی سمت چپ پلان براساس شماره‌های USGS و شماره‌های سمت راست پلان، نشان‌دهنده ی مقاطع مورد استفاده در شبیه‌سازی مذکور است.

مقاطع ۱۲ و ۱۳ دو مقطع عرضی تولیدی برای محل احداث پل و همچنین مقاطع ۱ ~ ۳ و ۲۰ ~ ۲۱، مقاطع تعمیمی براساس مشخصات و شیب‌های مقاطع ۴ و ۱۹ هستند (مقاطع ۹ و ۱ مؤسسه ی USGS). مقاطع ۵، ۷، ۸، ۱۰، ۱۵ و

احتمال گسترش آب‌سستگی یا انباشت مصالح را در جهت‌های جانبی و یا عمودی بررسی می‌کند. مدل رایانه‌ی لوله‌ی جریان برای مسیریابی آب و رسوب از ۳ بلوک محاسبه‌ی تشکیل شده است: ۱. محاسبات نیمرخ برگشت آب؛ ۲. محاسبات لوله‌ی جریان؛ ۳. محاسبات مسیریابی رسوب. این بلوک‌های محاسباتی در حین اجرای مدل با همدیگر گره می‌خورند. در هر مرحله ی زمانی، ابتدا محاسبات نیمرخ برگشت آب انجام می‌شود، که برای این منظور کل کانال به عنوان یک لوله‌ی جریان در نظر گرفته می‌شود. در مرحله ی دوم، با استفاده از تئوری کمینه‌ی انرژی، ترازهای سطح آب محاسبه و محل‌های جانبی لوله‌های جریان در هر مقطع عرضی مشخص شده است.^[۸]

در مرحله ی سوم، نظریه کمینه‌ی انرژی بررسی شده است. این نظریه برای اولین بار توسط یانگ و سانگ^۲ (۱۹۷۹ ~ ۱۹۸۶) ارائه شده است. قسمت خاصی از این نظریه عمومی به نام کمینه‌سازی کل قدرت جریان توسط چانگ و هیل^۳ (۱۹۷۶ ~ ۱۹۸۳) مورد استفاده قرار گرفته است.^[۸] این نظریه به این صورت تشریح شده است: برای کانال‌های آبرفتی، شرط لازم و کافی برای حالت تعادل زمانی اتفاق می‌افتد که قدرت جریان در واحد طول کانال (γQ_s) برای قیود داده شده، یک مقدار کمینه باشد؛ لذا یک کانال رسوبی با دبی Q و بار رسوب Q_s به عنوان متغیرهای مستقل تمایل دارد تا مقادیر عرض، عمق، و شیب خود را همانند قدرت جریان در مقدار کمینه حفظ کند. برای بسط فرایند کمینه‌سازی در متغیرهای کانال، لازم است که از قدرت جریان (γQ_s) در طول کانال انتگرال‌گیری شود (رابطه ی ۱):

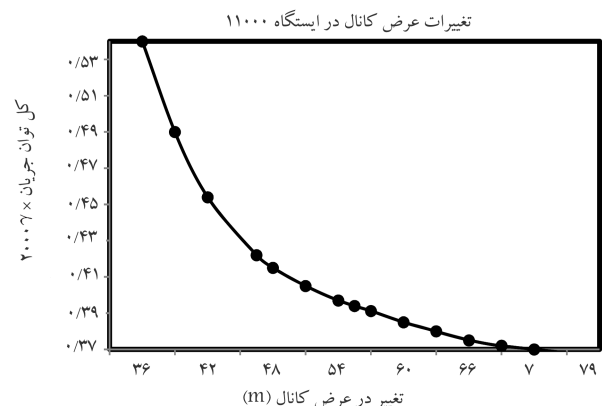
$$\phi_T = \int_x \phi_s(x) dx \quad (1)$$

که در آن، $\phi_s(x) = \gamma Q_s$ قدرت جریان در موقعیت x و در طول کانال است. رابطه ی ۱ را می‌توان به صورت رابطه ی ۲ گسسته‌سازی کرد:^[۸]

$$\left(\frac{Q_i S_i + Q_{i+1} S_{i+1}}{2} \right) \Delta x_i \phi_T = \sum_{i=1}^{N-1} \gamma \quad (2)$$

که در آن، N تعداد کل ایستگاه‌ها در طول محدوده مورد بررسی کانال، Δx_i فاصله ی بین ایستگاه‌های i و $i+1$ ، S_i ، Q_i به ترتیب شیب و دبی جریان در ایستگاه i است. شکل ۱، تغییرات قدرت جریان با تغییر در تراز بستر را به ازاء دبی ثابت نشان می‌دهد.^[۸]

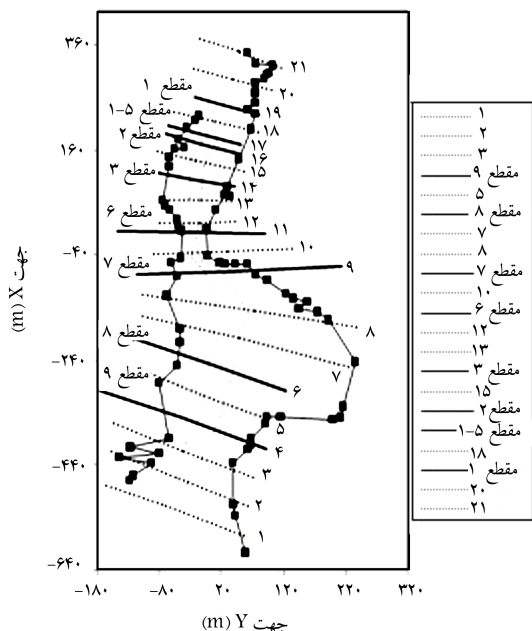
در مرحله ی چهارم، رسوب از طریق هر مجرای جریان،^۴ با ارضاء معادلات پیوستگی رسوب، مسیریابی می‌شود. معادله ی پیوستگی رسوب به صورت رابطه ی



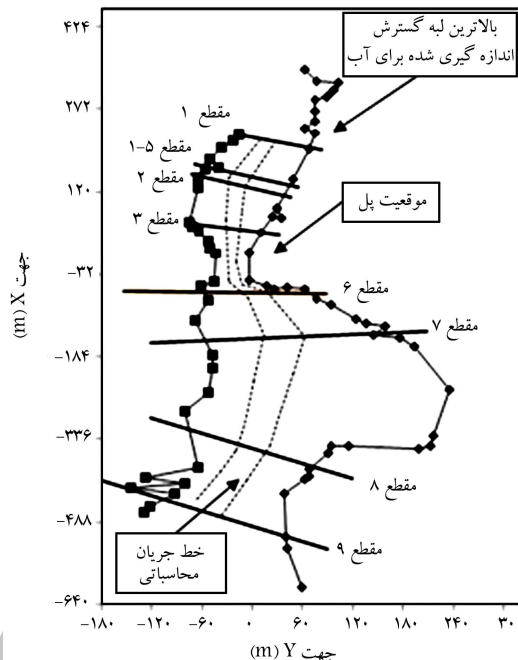
شکل ۱. تغییرات توان جریان با تغییر در تراز بستر.^[۸]

جدول ۱. خلاصه‌ی مقاطع عرضی اندازه‌گیری شده‌ی انترپوله شده و گسترش یافته (I انترپوله و P تعمیم یافته).

۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره‌ی مقطع	
		۱		۱-۵	۲		۳					۷			۸		۹					شماره‌ی USGS
P	P		I			I		I	I	I	I		I	I	I			P	P	P		نوع مقطع



شکل ۴. پلان نشان‌دهنده‌ی موقعیت مقاطع عرضی به کار رفته در شبیه‌سازی عددی.

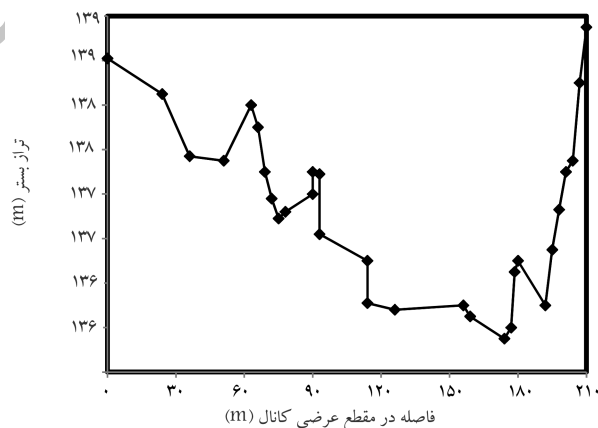


شکل ۲. پلان از محدوده‌ی مطالعاتی پل ۱۵ کالیفرنیا. [۸]

تخمین‌های FHWA^۷ ضریب زبری مانینگ در طول کانال اصلی مورد مطالعاتی برابر با ۰٫۴ در نظر گرفته شده و ضرایب اتلاف انرژی موضعی در موقعیت‌های احداث پل با استفاده از تراز بیشینه‌ی سطح آب، کالیبره شده‌اند. بیشینه‌ی اندازه‌ی مصالح بستر نیز، ۳/۵ (mm) ~ ۲/۳ تعیین و دبی رسوبات وارده به محدوده‌ی مطالعاتی برابر با ۳۰۰۰۰۰ (ton/day) معادل ۶۰۰۰ (parts/million) در نظر گرفته شده است. [۸]

۳.۲. شبیه‌سازی عددی

تعداد گام‌های گسسته‌سازی قسمت دبی - اشل برای تمام فایل‌های ورودی برابر با ۱۴۴ و زمان توسعه‌ی محاسبات نیز معادل ۰٫۰۰۶۹۴ روز یا معادل ۱۰ دقیقه بوده است. برای محاسبات روندیابی در طول کانال از معادله‌ی مولیناس و وو (۱۹۹۶)، که طبق نتایج FHWA مناسب‌ترین فرمول است، استفاده شده است. تعداد مجاری (لوله) جریان نیز بنا به توصیه‌ی FHWA برابر ۳ در نظر گرفته شده است. [۸] نهایتاً حدود دانه‌بندی رسوبات نیز به ۴ قسمت تقسیم و با تعیین کردن حدود بالا و پایین برای هر بازه، اطلاعات ورودی مربوط به رسوبات هم تکمیل شده است. درجه حرارت آب جاری در کانال برابر ۵۵ درجه‌ی فارنهایت انتخاب شده است. در ادامه، به منظور بررسی تأثیر فاصله‌ی پایه‌ها در شدت آب‌شستگی موضعی اطراف آن‌ها، نمونه‌های متعددی از ۱ یا ۲ پایه با نسبت‌های x/b متفاوت، در یکی از دو مقطع در نظر گرفته شده برای محل احداث پل مدل‌سازی شده‌اند. این تذکر لازم است که از بین فرمول‌های مورد تأیید FHWA، دو فرمول فروهلیچ (۱۹۸۸) و فرمول (۱۹۹۳)



شکل ۳. مقطع عرضی اندازه‌گیری شده‌ی شماره‌ی ۹. [۸]

۱۸ نیز مقاطعی هستند که از درون‌یابی و برون‌یابی مقاطع پایین دست و بالادست به دست آمده‌اند. در جدول ۱، مقاطع عرضی مورد مطالعه ارائه شده‌اند. مدت زمان تداوم سیلاب ۱۱ مارس ۱۹۹۵، تقریباً برابر ۱ روز و بیشینه‌ی دبی عبوری $20000 \text{ ft}^3/\text{s}$ بوده است. همچنین بیشینه‌ی تراز آب در مقطع شماره‌ی ۱۹ برابر 450.5 ft و ارتفاع تراز سطح آب در پایین دست مقطع کنترل شماره‌ی ۱، که در 1000 پایین دست مقطع شماره‌ی ۱۹ قرار دارد، برابر 448.5 ft بوده است. اطلاعات کاملی از ضرایب زبری و اتلاف انرژی در دست نیست، پس براساس

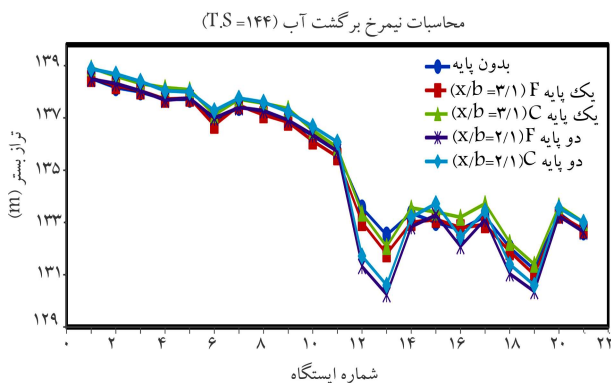
می‌دهند بین داده‌ها رابطه‌ی خطی برقرار است. اختلاف زیاد ضریب پیرسون با عدد ۱ بیانگر آن است که رابطه‌ی بین داده‌ها از نوع خطی نیست، و رگرسیون خطی صحیح نیست.

۴. نتایج و بحث

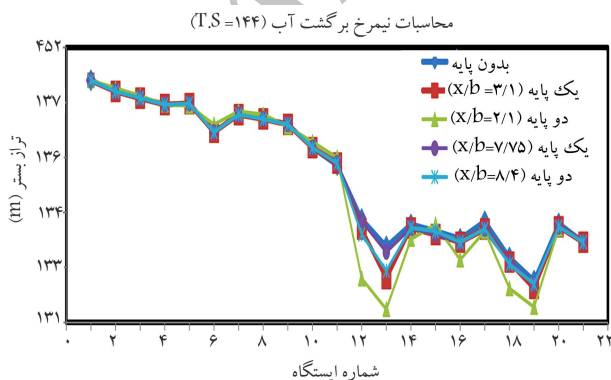
۴.۱. مقایسه‌ی فرمول‌های فروهلیچ و CSU

پس از مدل‌سازی نمونه‌های ارائه‌شده و با توجه به داده‌های حاصل از کالیبراسیون مدل عددی، مقایسه‌ی بین دو فرمول فروهلیچ و CSU انجام شده است. جهت بررسی دو فرمول مذکور، با اعمال دو نسبت $x/b = 2/1$ و $x/b = 3/1$ به ترتیب برای حالت تک‌پایه و دو پایه در مقاطع مخصوص برای احداث پل، و تأثیر هر یک از دو رابطه‌ی ذکرشده در تغییرات تراز بستر در شکل ۶ قابل مشاهده است.

با توجه به شکل مذکور ملاحظه می‌شود که مقادیر تراز بستر محاسبه‌شده در پایان گام زمانی آخر، برای معادله‌ی فروهلیچ پایین‌تر است و معادله‌ی ذکرشده مقادیر آب‌سستگی را بیشتر از معادله‌ی CSU ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر، برای مدل‌های مشابه، معادله‌ی فروهلیچ نسبت به معادله‌ی CSU محافظه‌کارانه‌تر است و آب‌سستگی را اندکی شدیدتر محاسبه می‌کند. به منظور بررسی تأثیر فاصله‌ی بین پایه‌ها در شدت آب‌سستگی و نیز مقایسه‌ی بیشتر دو معادله‌ی ذکرشده، تغییرات تراز بستر در x/b ‌های مختلف در دو حالت تک‌پایه و جفت‌پایه، در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. با توجه به نتایج و داده‌های خروجی هر کدام از محاسبات می‌توان



شکل ۶. تغییرات تراز بستر در مقاطع مختلف برای گام زمانی آخر، به هنگام استفاده از فرمول‌های فروهلیچ و CSU.



شکل ۷. تغییرات تراز بستر در مقاطع مختلف برای گام زمانی آخر، به هنگام استفاده از فرمول فروهلیچ برای مدل‌های مختلف x/b .

CSU برای انجام محاسبات آب‌سستگی موضعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روابط ۶ و ۷، به ترتیب فرمول‌های فروهلیچ و CSU را بیان می‌کنند:

$$\frac{d_{se}}{b} = 0.132 \phi \left(\frac{b_e}{b}\right)^{0.62} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.46} Fr^{0.2} \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.8} + 1 \quad (6)$$

$$\frac{d_{se}}{y} = 2K_1 K_2 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.23} \quad (7)$$

که در آن‌ها، d_{se} عمق آب‌سستگی تعادلی، b عرض پایه، y عمق جریان، Fr عدد فرود، D_{50} قطر متوسط ذرات رسوب، $b_e = b/y$ و ϕ به شکل پایه بستگی دارد. در رابطه‌ی CSU، K_1 ، K_2 به ترتیب تابعی از شکل پایه و زاویه‌ی برخورد جریان با پایه هستند. [۱۹، ۱۸]

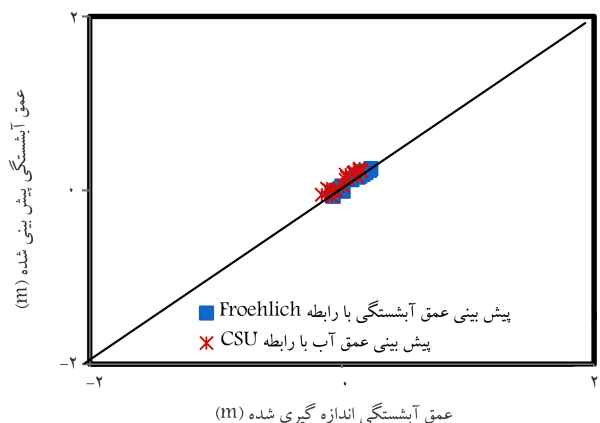
۳. صحت‌سنجی نتایج عددی

برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از نرم‌افزار BRI-STARS، از داده‌های میدانی موجود برای پل جفرسون باراکس^۸ بر روی رودخانه‌ی می‌سی‌سی‌پی^۹ استفاده شده است. بستر رودخانه‌ی می‌سی‌سی‌پی از مصالح ماسه‌یی با قطر متوسط ۰/۷ میلی‌متر تشکیل شده است. پل مذکور یک پایه به عرض ۲/۷۹ متر دارد و مقطع هندسی آن مربعی است. متوسط عمق جریان در رودخانه ۱۰/۶۸ متر و دبی بیشینه‌ی آن ۷۱۳ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است. [۲۰] عمق آب‌سستگی نیز با دو رابطه‌ی Froehlich و CSU محاسبه شده است. شکل ۵، مقایسه‌ی بیشینه‌ی فرسایش بستر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده را نمایش می‌دهد.

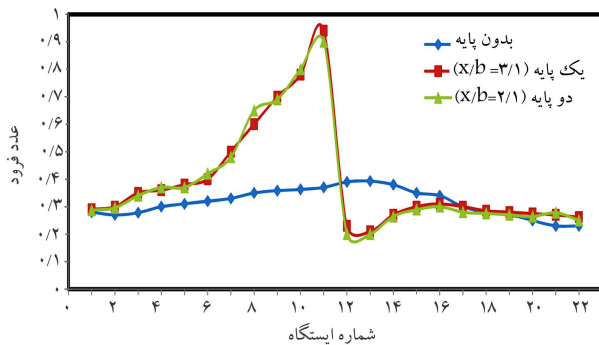
برای گروه داده‌های موجود (اندازه‌گیری شده) و برای داده‌های محاسباتی (پیش‌بینی شده)، رگرسیون خطی انجام شده است. ضریب پیرسون r برای هر گروه از داده‌ها (داده‌های به دست آمده از CSU و Froehlich) از رابطه‌ی ۸ به دست آمده است. ضریب پیرسون فقط در حالت رگرسیون خطی اعتبار دارد و اگر رابطه‌ی بین داده‌ها غیرخطی باشد، استفاده از ضریب پیرسون صحیح نخواهد بود. [۲۰، ۲۱]

$$r = \frac{n \sum (XY) - \sum (X) \sum (Y)}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (8)$$

ضریب r برای مدل‌سازی با CSU برابر ۰/۹۶۲ و در مدل‌سازی با رابطه‌ی فروهلیچ برابر ۰/۹۷۵ حاصل شده است. اعداد به دست آمده نزدیک به ۱ هستند، که نشان



شکل ۵. مقایسه‌ی مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری‌شده‌ی عمق آب‌سستگی بیشینه با استفاده از دو رابطه‌ی Froehlich و CSU.



شکل ۱. تغییرات عدد فرود در مقاطع مختلف برای گام زمانی آخر براساس نیمرخ برگشت آب (T.S. = ۱۴۴).

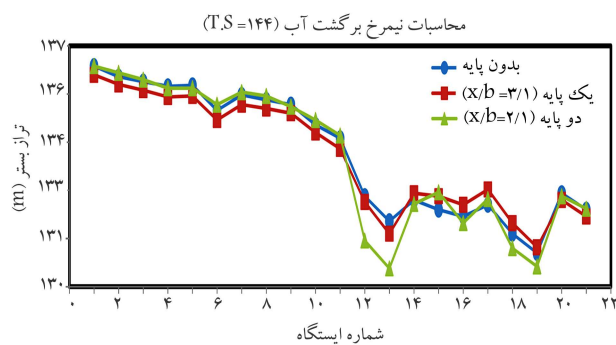
جدول ۲. تغییرات عدد فرود مقطع ۱۱ برای مدل‌های مختلف طراحی شده در مقاطع در نظر گرفته شده برای احداث پل.

عدد فرود در مقطع عرضی ۱۱	شماره‌ی مقطع عرضی برای احداث پل	حالت طراحی x/b
۰٫۳۷	۱۲	- بدون پایه
۰٫۳۹	۱۳	- بدون پایه
۱	۱۲	۲٫۴۸ تک پایه
۱	۱۲	۳٫۱ تک پایه
۱	۱۲	۲٫۱ جفت پایه
۱	۱۲	۵٫۲۵ جفت پایه
۰٫۹۴	۱۳	۲٫۴۸ تک پایه
۰٫۹۲	۱۳	۳٫۱ تک پایه
۱	۱۳	۲٫۱ جفت پایه
۰٫۹۳	۱۳	۵٫۲۵ جفت پایه

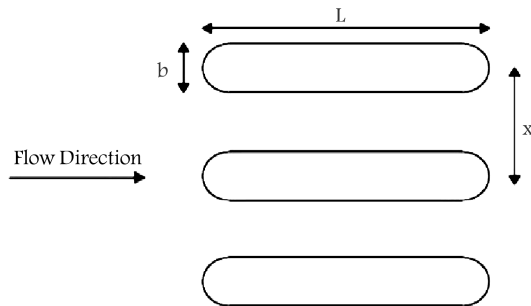
در شکل ۱، تغییرات عدد فرود در مقاطع مختلف در گام زمانی آخر ارائه شده است. لازم به ذکر است که این نمودارها براساس محاسبات نیمرخ برگشت آب است. با مطالعه و دقت بر روی نتایج خروجی حاصل از تحلیل مدل‌ها، امکان تشخیص مقطع بحرانی وجود دارد. مقطع ۱۱، مقطعی که در دهانه‌ی ورودی مقاطع از پیش انتخاب شده برای احداث پل (مقاطع ۱۲ و ۱۳) است، با داشتن بیشترین مقادیر سرعت آب و بیشینه‌ی تغییرات در عمق آب، مساعدترین شرایط را برای رسیدن به حالت بحرانی دارد. برای مدل‌های طراحی شده با $x/b < ۵٫۲۵$ در مقطع ۱۲، و همچنین برای مدل‌های طراحی شده با $x/b < ۲٫۱$ در مقطع ۱۳، عدد فرود در مقطع ۱۱ به بالاترین حد خود در مورد مطالعاتی رسیده و برابر ۱ شده است. لذا جریان آب در کانال در محدوده‌های یادشده برای مقطع ۱۱ حالت بحرانی دارد. در حالی که جریان در این مقطع قبل از احداث پل، عدد فرود متوسط ۰٫۳۸ داشته است. جدول ۲ و شکل ۱۱، چگونگی تغییر عدد فرود در بحرانی‌ترین حالت‌های موجود را برای مقاطع احداث پل نمایش می‌دهد.

۳.۴. تغییرات تراز بستر در مقاطع مختلف

در شکل ۱۲، تغییرات تراز بستر در گام زمانی آخر نمایش داده شده است. برای انتخاب حالت بهینه‌ی پایه‌ها و نیز مقطع عرضی مناسب برای احداث پل، از بین مقاطع در نظر گرفته شده (مقاطع ۱۲ و ۱۳)، جدول ۳ تنظیم شده است، به طوری که برای نسبت‌های مختلف x/b ، مقدار تراز بستر و میزان افزایش آب‌سُستگی در مقاطع



شکل ۸. تغییرات تراز بستر در مقاطع مختلف برای گام زمانی آخر، به هنگام استفاده از فرمول CSU برای مدل‌های مختلف x/b .



شکل ۹. شمای توصیفی از پایه‌ها در مسیر جریان.

مشاهده کرد که به هنگام استفاده از فرمول CSU، میزان افزایش آب‌سُستگی در مدل پایه‌های با $x/b > ۷$ ، قابل صرف نظر کردن بوده و تغییر در شدت آب‌سُستگی بسیار اندک است.

در مورد فرمول فروهلیچ، شرایط فوق به هنگام $x/b > ۸٫۵$ مهیا می‌شود و می‌توان از تأثیر عامل فاصله‌ی پایه‌ها در شدت آب‌سُستگی صرف نظر کرد. این نتیجه با مطالعه‌ی الیوت و بیکر (۱۹۸۵) مطابقت دارد. [۳] لذا بر مبنای داده‌های صحت‌سنجی و نتایج حاصل از این بخش، فرمول فروهلیچ برای سایر مدل‌سازی‌های مورد استفاده قرار می‌گیرد.

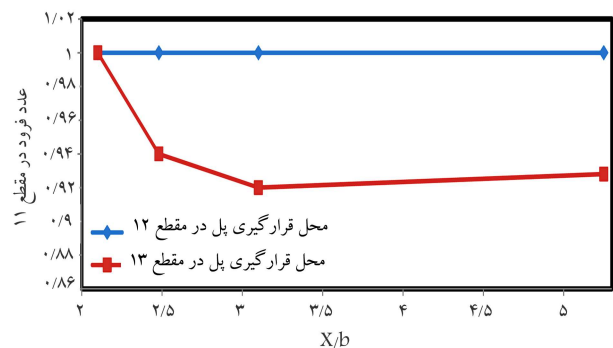
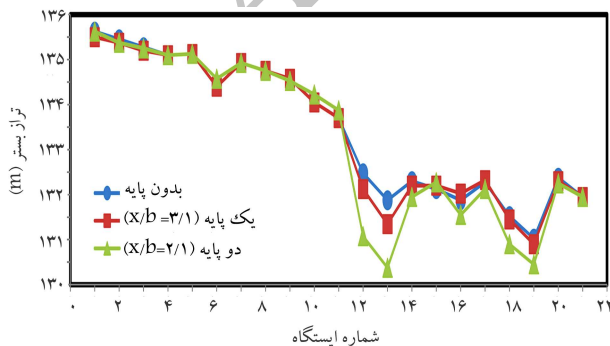
۲.۴. بررسی تأثیر عدد فرود

پس از مدل‌سازی محدوده‌ی مطالعاتی پل ۱۵ در حالت طبیعی آن، امکان بررسی کامل تغییرات پارامترهای هیدرولیکی، هندسی، و رسوبی وجود خواهد داشت. تغییرات حاصل که تحت بحرانی‌ترین شرایط، در هنگام وقوع سیل به وقوع می‌پیوندد، مبنای مقایسه قرار می‌گیرد. با مدل‌سازی پایه‌های پل فرضی با تعداد، ابعاد و نسبت‌های مختلف (x/b)، نتایج متفاوتی حاصل می‌شود. محاسبات مربوط به آب‌سُستگی پایه‌های پل نیز براساس فرمول فروهلیچ انجام خواهد شد. شکل ۹، فاصله‌ی پایه‌ها x و عرض آن‌ها b را نشان می‌دهد.

مقادیر مختلف (x/b) در حالت قرارگیری تک‌پایه در محل احداث پل برابر ۲٫۴۸، ۳٫۱، ۴٫۴۳، ۵٫۱۷، ۶٫۲، ۶٫۸۹، ۷٫۷۵ و در حالت طراحی جفت‌پایه در محل پل، ۲٫۱، ۳٫۵، ۴٫۲، ۵٫۲۵، ۶، ۷ و ۸٫۲ اختیار شده است. با توجه به فراوانی نمودارهای حاصل برای نسبت‌های انتخابی x/b ، نمودارهای مربوط به تأثیر افزودن پایه‌ها (فقط به ازاء ۲ مقدار $x/b = ۳٫۱$ در صورت استفاده از تک‌پایه، و $x/b = ۲٫۱$ در حالت جفت‌پایه، به همراه حالت اولیه‌ی شرایط کانال مورد مقایسه قرار گرفته است.

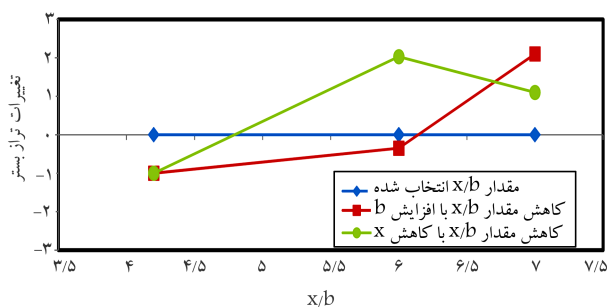
جدول ۳. مقادیر تراز بستر و افزایش عمق آب‌سستگی در پایان گام زمانی آخر برای مدل‌های انتخابی در مقاطع در نظر گرفته شده برای احداث پل.

حالت طراحی	x/b	شماره ی مقطع	محل مقطع (m)	تراز بستر (m)	افزایش آب‌سستگی (m)	d_s/d_{s_0}
بدون پایه	-	۱۳	۲۰۵	۱۳۲٫۲	۰	۱
بدون پایه	-	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۹	۰	۱
تک پایه	۲٫۴۸	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۴	۰٫۵۷	۱٫۳۵۹
تک پایه	۳٫۱	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۶	۰٫۳۸	۱٫۲۴۰
تک پایه	۴٫۴۳	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۶۶	۰٫۳۱	۱٫۲۰۰
تک پایه	۵٫۱۷	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۶۷	۰٫۳۱	۱٫۱۹۶
تک پایه	۶٫۲	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۶۵	۰٫۳۲	۱٫۲۰۳
تک پایه	۶٫۸۹	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۶۸	۰٫۲۹	۱٫۱۸۸
تک پایه	۷٫۷۵	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۷۱	۰٫۲۶	۱٫۱۶۷
تک پایه	۲٫۴۸	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۱۱	۱٫۱	۱٫۲۵۸
تک پایه	۳٫۱	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۶۶	۰٫۵۴	۱٫۲۳۳
تک پایه	۴٫۴۳	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۷۷	۰٫۴۴	۱٫۱۸۸
تک پایه	۵٫۱۷	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۸۱	۰٫۴۱	۱٫۱۷۷
تک پایه	۶٫۲	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۸۱	۰٫۴	۱٫۱۷۰
تک پایه	۶٫۸۹	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۸۲	۰٫۳۹	۱٫۱۶۶
تک پایه	۷٫۷۵	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۸۲	۰٫۳۸	۱٫۱۶۲
جفت پایه	۲٫۱	۱۲	۲۵۳	۱۳۱٫۳۵	۱٫۶۳	۲٫۰۲۷
جفت پایه	۳٫۵	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۱۰	۰٫۸۷	۱٫۵۵۱
جفت پایه	۴٫۲	۱۲	۲۵۳	۱۳۲٫۲۷	۰٫۷	۱٫۴۴۳
جفت پایه	۵٫۲۵	۱۲	۲۵۳	۱۳۱٫۶۳	۱٫۳۴	۱٫۸۴۶
جفت پایه	۶	۱۲	۲۵۳	۱۳۱٫۶۵	۱٫۳۲	۱٫۸۳۷
جفت پایه	۷	۱۲	۲۵۳	۱۳۱٫۷۲	۱٫۲۵	۱٫۷۸۹
جفت پایه	۲٫۱	۱۳	۲۰۵	۱۳۰٫۴۷	۱٫۷۳	۱٫۷۳۸
جفت پایه	۳٫۵	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۰۸	۱٫۱۳	۱٫۴۸۳
جفت پایه	۴٫۲	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۳۵	۰٫۸۶	۱٫۳۶۵
جفت پایه	۵٫۲۵	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۰۳	۱٫۱۹	۱٫۵۰۴
جفت پایه	۶	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۰۳	۱٫۱۸	۱٫۵۰۳
جفت پایه	۷	۱۳	۲۰۵	۱۳۱٫۰۸	۱٫۱۲	۱٫۴۷۹



شکل ۱۲. تغییرات تراز بستر در مقاطع مختلف برای گام زمانی آخر براساس محاسبات نیمرخ برگشت آب.

شکل ۱۱. تغییرات عدد فرود مقطع ۱۱ براساس نسبت‌های (x/b) متعدد در مقاطع در نظر گرفته شده برای احداث پل.



شکل ۱۵. تأثیر کاهش یا افزایش عامل x و b به هنگام تغییر نسبت x/b بر روی تغییرات تراز بستر.

مدل طراحی تک پایه:

$$\frac{d_s}{d_{s_0}} = -0.00008 \left(\frac{x}{b}\right)^5 + 0.023 \left(\frac{x}{b}\right)^4 - 0.254 \left(\frac{x}{b}\right)^3 + 1.389 \left(\frac{x}{b}\right)^2 - 3.755 \left(\frac{x}{b}\right) + 5.210 \quad (9)$$

مدل طراحی جفت پایه:

$$\frac{d_s}{d_{s_0}} = 0.0004 \left(\frac{x}{b}\right)^5 - 0.09 \left(\frac{x}{b}\right)^4 + 0.857 \left(\frac{x}{b}\right)^3 - 3.731 \left(\frac{x}{b}\right)^2 + 7.215 \left(\frac{x}{b}\right) - 3.144 \quad (10)$$

در حالات مختلف موجود برای مدل‌های طراحی شده، عموماً شدت آب‌سستگی موضعی با کاهش نسبت x/b افزایش می‌یابد.

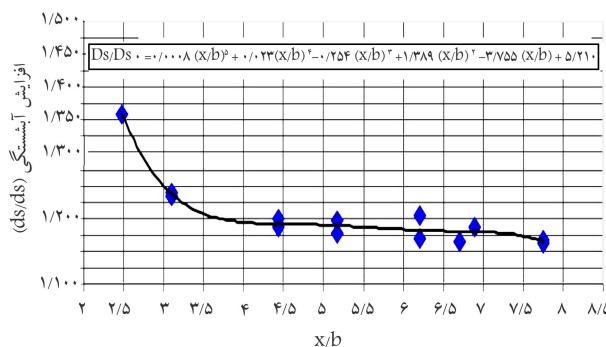
در این پژوهش، مدل‌های طراحی شده براساس نسبت‌های مختلف x/b بوده است، که تأثیر تغییرات این نسبت در موارد مختلف هیدرولیکی (در حالت b ثابت) مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، تأثیر پارامترهای x و b به صورت مجزا و به هنگام کاهش x/b ، زمانی که شرایط بحرانی ایجاد می‌شود، بررسی شده و حدود تأثیر پذیری نسبت x/b از پارامترهای x و b ، و نهایتاً تغییرات ایجاد شده در تراز بستر به صورت نمودار شکل ۱۵ قابل نمایش است.

با توجه به تغییرات ایجاد شده در تراز بستر به هنگام کاهش x/b ، در مدل‌های با نسبت $x/b < 4/2$ ، کاهش مقدار x و یا افزایش مقدار b تأثیر یکسانی در کاهش x/b و ایجاد تغییر در شدت آب‌سستگی ندارند. لذا قبل از عدد ۴، نمودار ترسیم نشده است. برای محدوده‌ی $4/2 < x/b < 6/7$ ، تأثیر کاهش x در افزایش آب‌سستگی بیش از تأثیر افزایش b و برای نسبت‌های $x/b > 6/7$ ، تأثیر افزایش b بیش از تأثیر کاهش x بوده است. خط افقی بیان‌گر حالتی است که مقدار b ثابت بوده و فقط مقدار x تغییر داده شده است.

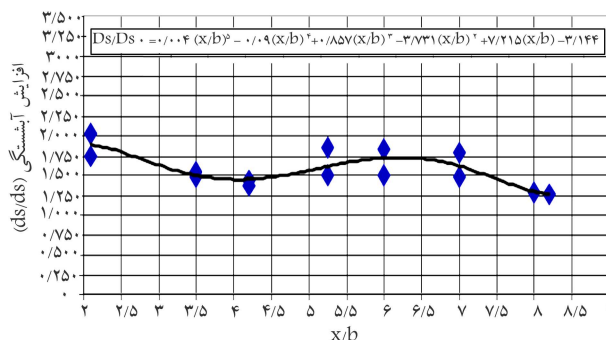
عمق جریان نیز تا محدوده‌ی مشخصی در آب‌سستگی مؤثر است ($y/b < 3/2$). در مقادیر بالاتر، افزایش عمق آب‌سستگی مشاهده نمی‌شود. این نتیجه تا حدود بسیار زیادی با نتایج کار رادکیوی و اتما (۱۹۸۳)^[۴] مطابقت دارد. همچنین قابل ذکر است که با کاهش فاصله‌ی پایه‌ها، محدوده‌ی اثر عمق جریان کمتر شده و به مقدار $y/b < 2/75$ تنزل یافته است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه‌ی موردی پایه‌های پل ۱۵ کالیفرنیا با استفاده از نرم‌افزار BRI-STARS، براساس اطلاعات موجود مدل‌سازی و دو مدل طراحی تک پایه و



شکل ۱۳. برازش مناسب‌ترین نمودار و معادله‌ی افزایش عمق آب‌سستگی براساس نسبت x/b ‌های مختلف برای حالت تک پایه.



شکل ۱۴. برازش مناسب‌ترین نمودار و معادله‌ی افزایش عمق آب‌سستگی براساس نسبت x/b ‌های مختلف برای حالت جفت پایه.

۱۲ و ۱۳ را نسبت به حالت طبیعی اولیه ارائه می‌دهد. در جدول ۳، بیانگر عمق آب‌سستگی در حالت بدون پایه و d_s عمق آب‌سستگی در حالات طراحی است.

با بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل مدل‌های متعدد با نسبت‌های x/b مختلف و با توجه به مقادیر آب‌سستگی اطراف پایه‌ها و میزان افزایش آن در مدل‌های مختلف می‌توان تا حد زیادی بهترین حالت برای قرارگیری پل و پایه‌ها را انتخاب کرد. در مجموع، حالت تک پایه به علت کاهش احتمال تداخل گردابه‌های برخاستگی^{۱۰} برای مقاطع انتخاب شده، جهت احداث پل مناسب‌تر است. از بین دو مقطع ۱۲ و ۱۳ نیز مقطع ۱۲ با نسبت $x/b = 4/3$ بهتر است. مقطع ۱۳، به لحاظ تنگ‌شدگی کانال در دهانه‌ی ورودی آن، آب‌سستگی‌های بزرگ‌تری را نشان می‌دهد و برای احداث پل مناسب نیست.

۴.۴. شدت آب‌سستگی موضعی و برازش اطلاعات خروجی

با بهره‌گیری از اطلاعات جدول ۳ و داده‌های خروجی، برازش نتایج آب‌سستگی با توجه به نتایج x/b موجود در مقاطع موردنظر براساس نمودار شکل‌های ۱۲ و ۱۳ خواهد بود. لازم به ذکر است که تمامی محاسبات آب‌سستگی اطراف پایه‌ها براساس فرمول فروهلیچ انجام و نقاط روی شکل براساس بهترین و مناسب‌ترین نمودار برازش شده‌اند. معادله‌ی افزایش عمق آب‌سستگی براساس x/b ‌های مختلف برای تمام حالات ممکن پیش‌بینی شده است. شکل ۱۳، برازش مناسب‌ترین نمودار برای حالت طراحی تک پایه، و شکل ۱۴، برازش مناسب‌ترین نمودار برای حالت طراحی جفت پایه است. فرمول حاصل برای افزایش عمق آب‌سستگی برای حالات طراحی به صورت روابط ۹ و ۱۰ است:

مقاطع موجود (مقطع ۱۳ در این مطالعه موردی) در ابتدای تنگ‌شدگی‌ها، به علت قرارگیری در شرایط جریان بحرانی برای احداث پل مناسب نیستند. مقطع ۱۱، که در دهانه‌ی ورودی مقاطع انتخابی برای احداث پل واقع است، بیشترین مقدار سرعت بیشینه و بیشینه‌ی تغییرات عمق آب و تراز بستر را داشته و شرایط بحرانی را شامل شده است. برای سایر مقاطع $Fr < ۱$ خواهد بود. شدت آب‌سستگی موضعی با کاهش x/b (به ویژه به مقادیر پایین‌تر از ۴) افزایش می‌یابد. با کاهش مقدار نسبت x/b در بحرانی‌ترین حالت، برای محدوده‌ی $x/b < ۴/۲$ ، کاهش x و یا افزایش b تأثیر یکسانی در تغییرات آب‌سستگی داشته‌اند. برای محدوده‌ی $۴/۲ < x/b < ۶/۷$ ، کاهش x تأثیر بیشتری داشته و برای نسبت‌های $x/b > ۶/۷$ ، افزایش b مؤثرتر بوده است. عمق نسبی جریان نیز در محدوده‌ی $y/b < ۳/۲$ در آب‌سستگی مؤثر بوده است. با کاهش فاصله‌ی پایه‌ها، محدوده‌ی اثر عمق نسبی به $y/b < ۲/۷۵$ رسیده است.

جفت‌پایه در محل احداث پل انتخاب شده است. به‌منظور بررسی تأثیر نسبت‌های مختلف x/b در پارامترهای هیدرولیکی، رسوبی، و هندسی، تغییرات موجود تحت شرایط وقوع سیلاب، که بحرانی‌ترین حالت است، به‌عنوان مبنای مقایسه‌ها انتخاب شده است. برای محاسبات آب‌سستگی اطراف پایه‌ها، ۲ فرمول فروهلیچ و CSU بررسی و معلوم شده است که معادله‌ی فروهلیچ آب‌سستگی را حدود ۱۱٪ بیشتر از CSU تخمین زده و به لحاظ طراحی محافظه‌کارانه‌تر بوده است. به هنگام استفاده از فرمول CSU، میزان افزایش عمق آب‌سستگی در مدل‌های با نسبت $x/b < ۷$ و در فرمول فروهلیچ برای نسبت‌های $x/b < ۸/۵$ قابل صرف‌نظر کردن است. از این دو مدل طراحی تک‌پایه و جفت‌پایه، حالت تک‌پایه به علت داشتن فضای حرکت بیشتر برای جریان آب و کاهش احتمال تداخل گردابه‌های برخاستگی و به دنبال آن کاهش تشدید تنش برشی در اطراف پایه‌ها، نسبت به مدل‌های دو و یا چندپایه، آب‌سستگی‌های کمتری نشان داده و ترجیحاً مناسب‌تر است. همچنین

پانویس‌ها

1. bridge stream tube model for alluvial river simulation
2. Yang & Sang
3. Chang & Hill
4. stream tubes
5. Los Gatos Creek
6. United State geological survey
7. federal highway administration
8. Jefferson Barracks
9. Mississippi
10. wake vortices

منابع (References)

1. Laursen, E.M. "Scour at bridge crossing, Iowa highway research board bulletin 8", Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa City, IA (1985).
2. Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and Shen, H.W. "Local scour around cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Research*, **15**(3), pp. 211-252 (1977).
3. Elliott, K.R. and Baker, Ch.J. "Effect of pier spacing on scour around bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **111**(7), pp. 1105-1109 (1985).
4. Raudkivi, A.J. and Ettema, R. "Clear water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **109**(3), pp. 339-350 (1983).
5. Johnson, P.A. "Reliability-based pier scour engineering", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **118**(10), pp. 1344-1357 (1992).
6. Hassanzadeh, Y., Kardan, N. and Hakimzadeh, H. "3D numerical studying into combined models of pier shape and slot in reducing the bed shear stresses starter of scouring around the bridge pier", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, **44**,4(77), pp. 39-50 (2015).
7. Baker, Ch.J. "New design equation for scour around bridge piers", *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, **107**(HY4), pp. 507-511 (1981).
8. Federal Highway Administration (FHWA), *River Engineering for Highway Encroachments: Highways in the River Environment*, FHWA NHI-01004, Federal Highway Administration, Hydraulic Design Series No. 6, U.S. Department of Transportation, Washington, D.V. (Richardson, E.V., Simons, D.B., and Lagasse, P.F.) (2001).
9. Johnson, P.A. "Comparison of pier scour equations using field's data", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **12**(8), pp. 626-629 (1995).
10. Breusers, H.N.C. "Scour around drilling platforms", *International Association of Hydraulic Research*, **19**, pp. 276-283 (1965).
11. El-Taher, R.M. "Flow around two parallel circular cylinders in a linear shear flow", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **21**(3), pp. 251-272 (1985).
12. Beg, M. "Characteristics of developing scour holes around two piers placed in transverse arrangement", *Int. Conf. on scour and and Erosion (ICSE-5)*, San Francisco, California, US, pp.76-85 (2010).
13. Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J.P. and Cardoso, A.H. "Clear-water scour at pile groups", *Journal of Hydraulic Engineering*, **139**(10), pp. 1089-1098 (2013).
14. Zuhilmi, I., Mazlin, J., FaridahJaafar, S., Ahmad Khairi Abd, W. and Zulkiflee, I. "Scour investigation around single and two piers side by side arrangement", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **2**(10), pp. 459-465 (2013).
15. Movahedi, N., Dehghani, A.A., Aarabi, M.J. and Zahiri, A.Z. "Temporal evolution of local scour depth around side-by-side piers", *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, **3**(3), pp. 82-86 (2013).

16. Bidokhti, N. and Asadi Aghbolagh, M. "Investigation of scour depth at bridge piers using Bri-STARS model", *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B-Engineering*, **30**(B4), pp. 541-554 (2006).
17. Shaheidifar, Gh. and Raesizadeh, F. "Investigation of scour depth at bridge piers using BRI-stars model in Iran", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **58**, pp. 811-814 (2011).
18. Froehlich, D.C., "Analysis of onsite measurements of scour at piers", in *American Society of Civil Engineers National Conference on Hydraulic Engineering: Colorado Springs, CO*, American Society of Civil Engineers, pp. 534-539 (1988).
19. U.S. Department of Transportation, *Evaluating Scour at Bridges*, Hydraulic Engineering, Circular No. 18, Rep No. FHWA-IP-90-017, Federal Hwy. Administration (FHWA), Washington, D.C., USA (1993).
20. Talebbeydokhti, N. and Asadi Aghbolaghi, M. "Investigation of scour depth at bridge piers using BRI-STARS Model", *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction B, Engineering, **30**(B4), pp. 541-554 (2006).
21. Gaudio, R., Tafarojnoruz, A. and De Bartolo, S. "Sensitivity analysis of bridge pier scour depth predictive formulae", *Journal of Hydro Informatics*, **15**(3), pp. 939-945 (2013).

Archive of SID