



## بررسی کمی عوامل موثر بر رفتار پایه‌های پل بتن مسلح در برابر سیلاب

فاطمه شهاب‌الدین، مهدی دهستانی\*، حسین یوسف‌پور

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۵  
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹

### کلمات کلیدی:

پل، بتن مسلح  
سیلاب  
آب شستگی  
روش اجزای محدود

**خلاصه:** ارزیابی آسیب‌پذیری پل‌ها در برابر خطر سیلاب جهت اتخاذ سیاست‌های مناسب در تعمیر و تقویت آن‌ها ضروری است. هدف از مطالعه حاضر، ارائه‌ی یک الگوی نظام‌مند جهت بررسی رفتار پایه پل‌ها در برابر خطر سیلاب و حساسیت‌سنجی رفتار پل‌ها به پارامترهای سازهای، ژئوتکنیکی و هیدرولیکی می‌باشد. یک مدل اجزای محدود غیرخطی سه بعدی با در نظر گرفتن خصوصیات مصالح و تعامل سازه با خاک و آب توسعه داده شده و پارامترهای آن با داده‌های به دست آمده از آزمایش بارگذاری جانبی یک تک شمع بتنی مدفون در خاک و یک نمونه تک پایه بتنی تحت بار محوری و جانبی صحت‌سنجی گردید. پس از همگرایی لازم بین نتایج آزمایشگاهی و عددی، مدل یک پایه پل موجود به صورت تحلیلی ساخته شده و رفتار سازه در برابر خطر سیلاب در شرایط متفاوت سازهای، ژئوتکنیکی و هیدرولیکی بررسی گردید. نتایج نشان دهنده‌ی مناسب بودن الگوی انتخاب شده برای بررسی رفتار پایه‌های پل در برابر خطر سیلاب بوده و توانایی این رویکرد را برای شبیه‌سازی طیف وسیعی از سناریوهای مرتبط با سیلاب برای پل‌ها نشان می‌دهد. همچنین مشاهده گردید که رفتار پایه پل‌ها در برابر بار سیلاب، به پارامترهای ژئوتکنیکی و هیدرولیکی، نسبت به پارامترهای سازه‌ای حساسیت بیشتری داشته است؛ به گونه‌ای که با تغییر نوع خاک از دانه‌ای متوسط به دانه‌ای سست، جابجایی جانبی سازه ۱/۸۷ برابر شده است. همچنین با افزایش شیب طولی کف بستر از ۰/۰۰۴ به ۰/۰۰۵ و کاهش ضریب زبری از ۰/۰۲۵ به ۰/۰۲۱، جابجایی جانبی سازه به ترتیب به میزان ۲/۵۷ و ۶/۵۵ برابر مقدار اولیه آن تغییر خواهد یافت.

### ۱- مقدمه

است [۴]. تجزیه و تحلیل یکپارچه‌ی پل‌ها می‌تواند به صاحبان پل و ادارات حمل و نقل کمک کند تا ظرفیت، ثبات و یکپارچگی پل‌های در معرض آب شستگی را ارزیابی کنند و از خرابی پل‌ها در سیلاب‌های بحرانی جلوگیری نمایند [۵].

در نظر گرفتن وضعیت آب شستگی پایه‌ها، در بررسی آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر سیلاب اهمیت اساسی دارد. به طور کلی، احداث پل‌ها حتی بدون رخدادهای سیلاب نیز به چند دلیل باعث حذف رسوبات بستر می‌گردد. اول آن که برای کاهش هزینه احداث پل‌ها، معمولاً مجموعه دهانه‌های پل، کوچک‌تر از عرض رودخانه در نظر گرفته می‌شود و تجمع جریان در محل تنگ شدگی، موجب افزایش تنش برشی در بستر می‌شود که شسته شدن بستر را در پی دارد. به این آب شستگی، آب شستگی ناشی از انقباض (تنگ شدگی) گفته می‌شود. دوم، به دلیل وجود پایه و تکیه‌گاه، حالت سه بعدی جریان گردابی در اطراف آن‌ها تولید شده و منجر به جدا شدن دانه‌ها از بستر و «آب شستگی موضعی» می‌شود. علاوه بر اثرات ناشی از ساخت پل، چنانچه در مسیر

امروزه روند توسعه در بسیاری از کشورها باعث تخریب محیط زیست و تغییر در رژیم‌های سیلابی شده و به همین دلیل، خطرپذیری در مقابل سیل، هر ساله در حال افزایش می‌باشد. آب شستگی به عنوان پدیده‌ای طبیعی در جریان سیلاب، منجر به حذف خاک اطراف فونداسیون پل‌ها می‌گردد و این امر آسیب‌پذیری پل‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱]. بررسی حدود ۵۰۰ مورد تخریب پل در ایالت متحده آمریکا بین سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۰ نشان داد که عوامل هیدرولیکی مرتبط با سیل همانند آب شستگی و فشار آب، حدود ۵۳ درصد کل خرابی‌ها را به خود اختصاص دادند [۲]. به طور مشابه، در بررسی علل خرابی ۶۳ مورد پل واقع در کلمبیا بر اساس گزارش‌هایی از سال ۱۹۸۶، ۶۴ درصد موارد شکست مربوط به سازه‌های بتنی بوده که دلیل عمده خرابی آن‌ها آب شستگی و اضافه سربار گزارش شده است [۳]. موارد شکست مشابه در سایر نقاط جهان نیز گزارش شده

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dehestani@nit.ac.ir



$P_{13}-P_{16}$  پل مزبور را با استفاده از یک روش تجزیه و تحلیل شبه استاتیکی غیرخطی بررسی کردند. نتایج نشان دادند که با افزایش عمق آب شستگی، شیب منحنی ظرفیت کاهش یافته و بار مربوط به حالت تسلیم و حالت شکست نهایی برای عمق‌های آب شستگی بیشتر، مقادیر کمتری را به خود اختصاص می‌دهند.

بررسی تاثیر پدیده آب شستگی بر ویژگی‌های دینامیکی پل‌ها، موضوع مطالعات متعددی در سال‌های اخیر بوده است [۱۰-۱۲]. کیزیلدومان<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۳] به بررسی پایداری پایه‌های پل در معرض سیلاب و به دنبال آن زلزله پرداختند و در مطالعه‌ای موردی، کاهش پایداری سازه برای خمش ستون، بار محوری، لنگر و ظرفیت برشی شمع را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که برای پل‌های در معرض آب شستگی، ظرفیت باربری شمع به میزان ۱/۷ درصد کاهش و نیروی برشی لرزه‌ای شمع به اندازه ۲۰/۷ درصد افزایش می‌یابد.

بنت<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۴] در بررسی رفتار یک پل تحت شرایط آب شستگی و بار جانبی، نشان دادند که با رسیدن عمق آب شستگی تا زیر سرشمع، گیرداری بین شمع و سرشمع کاهش یافته و انحراف بالای شمع به صورت نمایی افزایش می‌یابد. بر این اساس توصیه گردید همواره شرایطی فراهم گردد که محل اتصال شمع و سرشمع زیر سطح زمین نگه داشته شود. ییلماز<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۵] عملکرد لرزه‌ای دو پل واقع در کالیفرنیا را تحت شرایط احتمالی سیلاب و زلزله بررسی کردند و منحنی شکنندگی لرزه‌ای بر اساس سطوح حدی تولید گردید. نتایج نشان دادند که وقوع سیلاب، آسیب‌پذیری لرزه‌ای را افزایش می‌دهد. پل اول مورد بررسی با شمع‌هایی با قطر بزرگ‌تر و فلسفه طراحی لرزه‌ای شکل‌پذیرتر، حساسیت کمتری نسبت به خطر سیلاب از خود نشان داد؛ در حالی که در پل دوم، افزایش ارتفاع پایه پل و افزایش عمق آب شستگی منجر به آسیب لرزه‌ای بیشتر گردید.

وانگ<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۶] به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف طراحی بر عملکرد لرزه‌ای پل‌های در معرض پدیده آب شستگی پرداختند. نتایج نشان دادند که با افزایش عمق آب شستگی، تاثیر پارامترهای مرتبط با ستون (ارتفاع ستون و نسبت فشار محوری) و پارامترهای مرتبط با خواص خاک (چگالی نسبی خاک) بر عملکرد لرزه‌ای پل کاهش می‌یابد؛ در حالی که تاثیر پارامترهای شمع (قطر شمع‌ها، فاصله مرکز به مرکز شمع و نسبت

رودخانه به واسطه‌ی افزایش دبی و سرعت، آب شستگی عمومی رخ دهد، این کاهش تراز نیز به آب شستگی حاصل از احداث پل اضافه می‌گردد [۶]. اثرات آب شستگی بر روی عملکرد سازه، عموماً با حذف خاک اطراف شمع‌ها شبیه‌سازی می‌گردد. بر همین اساس، تخمین عمق آب شستگی در شبیه‌سازی اثر آن بر روی سازه اهمیت قابل توجهی دارد. در تخمین عمق آب شستگی، آب شستگی موضعی به دلیل ایجاد الگوی جریان‌های پیچیده همچون گرداب‌های نعل اسبی<sup>۱</sup>، گرداب‌های برخاستگی<sup>۲</sup> و موج کمائی<sup>۳</sup> دارای اهمیت زیادی می‌باشد [۶]. محققین روابط متعددی را برای محاسبه عمق آب شستگی موضعی ارائه کرده‌اند. از جمله مهم‌ترین این معادلات در دستورالعمل ارزیابی آب شستگی پل‌ها توسط اداره بزرگراه‌های آمریکا<sup>۴</sup> منتشر شده و به محاسبه‌ی عمق آب شستگی اطراف پایه‌های پل با هندسه پیچیده در شرایط آب زلال و آب حاوی رسوب می‌پردازد و در قسمت‌های بعدی مقاله‌ی حاضر به آن‌ها اشاره می‌گردد [۶].

رفتار پل‌های متکی بر شمع و در معرض آب شستگی ناشی از سیلاب، در سال‌های اخیر در مطالعات متعددی بررسی شده است. لین<sup>۵</sup> و همکاران [۷] به بررسی تحلیلی پل‌های متکی بر شمع با در نظرگیری اندرکنش میان سازه، خاک و آب پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش عمق آب شستگی منجر به افزایش نیروی برشی و لنگر خمشی اعمالی به شمع‌ها شده و با افزایش عمق آب شستگی از ۱ و ۲ متر به ۳ و ۵ متر، ظرفیت کماتشی به میزان ۴۲ درصد کاهش و احتمال خرابی شمع‌ها افزایش یافته است.

رفتار سازه پل شوانگ - یوان<sup>۶</sup> که در سیلاب سال ۲۰۰۹ کشور تایوان دچار تخریب گردید، موضوع تعدادی از مطالعات بوده است. هونگ<sup>۷</sup> و یاو<sup>۸</sup> [۸] تاثیر عمق آب شستگی در پایه‌های این پل را با استفاده از پارامترهای مختلف عملکرد از جمله مقاومت و سختی جانبی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در صورت نبود آب شستگی، می‌توان از ظرفیت تغییر شکل غیرخطی پایه و فونداسیون شمع بهره برداری نمود؛ اما با وقوع آب شستگی، شمع به عنوان مولفه حاکم در مکانیزم تحمل نیرو تبدیل شده و مقاومت و سختی جانبی به شدت کاهش می‌یابد. کو<sup>۹</sup> و همکاران [۹] پایه‌های  $P_{10}-P_{13}$  و

- 1 Horseshoe Vortex
- 2 Wake Vortex
- 3 Bow Wave
- 4 Federal Highway Administration (FHWA)
- 5 Lin
- 6 Shuang-Yuan
- 7 Hung
- 8 Yau
- 9 Ko

- 10 Klzllduman
- 11 Bennett
- 12 Yilmaz
- 13 Wang

آرما توره‌های طولی) افزایش می‌یابد.

از سیلاب، یک مدل اجزای محدود سه بعدی غیرخطی توسعه داده شده و صحت‌سنجی می‌گردد. استفاده از مدل خرابی پلاستیک بتن<sup>۶</sup> در آنالیز اجزای محدود، منجر به در نظر گرفتن دقیق‌تر زوال در مدل سازه بتن شده و به کارگیری فنرهای وینکلر غیرخطی برای تعامل میان خاک و سازه به کاهش هزینه‌های محاسباتی و حجم مدل منجر می‌گردد. مدل مزبور علاوه بر قابلیت کاربردی بالا، قادر به در نظر گرفتن آب شستگی و اندرکنش بین پایه‌های پل، شمع، خاک و جریان آب می‌باشد. از این مدل برای بررسی رفتار پایه‌های پل در معرض پدیده آب شستگی در هنگام سیل و بررسی تاثیر پارامترهای سازه‌ای مقاومت فشاری بتن و تنش تسلیم فولاد، پارامترهای ژئوتکنیکی، و پارامترهای هیدرولیکی استفاده می‌گردد.

## ۲- مدل سازی

جهت مدل‌سازی اثر سیلاب با در نظر گرفتن اثر آب شستگی در مطالعه‌ی حاضر، از یک مدل سه بعدی غیرخطی در محیط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس<sup>۷</sup> استفاده می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این بخش، فرضیات مورد استفاده در مدل اجزای محدود معرفی می‌شوند.

### ۲-۱- رفتار مصالح

خواص مصالح بتن در دو ناحیه مجزای محصور نشده و محصور شده با آرما تور عرضی تعریف گردید. خواص تنش-کرنش فشاری آن در ناحیه محصور شده به کمک مدل مندر<sup>۸</sup> [۲۴]، در ناحیه محصور نشده با استفاده از مدل هاگنستاد اصلاح شده<sup>۹</sup> [۲۵] و در کشش به کمک مدل بلاربی<sup>۱۰</sup> و شو<sup>۱۱</sup> [۲۶] اعمال شد. برای در نظر گرفتن خرابی مصالح بتن در نرم‌افزار، سه نوع ترک خوردگی شامل مدل ترک پخشی<sup>۱۲</sup>، مدل ترک شکننده<sup>۱۳</sup> و مدل خرابی پلاستیک بتن قابل مدل‌سازی است. مدل خرابی پلاستیک بتن، قابلیت مدل‌سازی بتن و دیگر مواد شبه ترد را در تمامی اشکال سازه‌ای دارد و شبیه‌سازی واقعی‌تری از رفتار بتن را فراهم می‌کند. همچنین برای مدل‌سازی آسیب بتن‌های مسلح و غیرمسلح، تحت انواع بارهای یک طرفه و رفت و برگشتی قابل استفاده است. کاربرد گسترده‌ی این مدل، موجب شد

آوزار<sup>۱</sup> و همکاران [۱۷] به بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های رودخانه‌ای قدیمی در معرض آب شستگی پرداختند. نتایج نشان دادند که با افزایش عمق آب شستگی، انعطاف‌پذیری اضافی در سازه ایجاد می‌گردد که منجر به افزایش جابجایی افقی روسازه در حرکت زمین لرزه می‌شود؛ به نحوی که با در نظرگیری دو مورد شدید برای عمق آب شستگی، جابجایی افقی روسازه تحت بار زلزله دو برابر شرایط بدون آب شستگی بوده است.

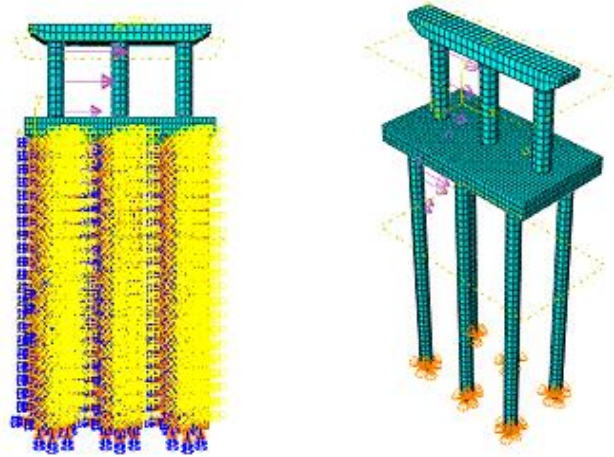
کلینگا<sup>۲</sup> و علیپور [۵] مدل‌های جامعی از پل را با در نظرگیری تعامل غیرخطی میان آب، خاک و سازه توسعه دادند. مقایسه پاسخ سازه در لایه‌های مختلف خاک نشان داد که آب شستگی بر روی لایه‌های خاک رس در مقایسه با لایه‌های خاک دانه‌ای، تاثیر کمتری روی افزایش انحراف جانبی سازه خواهد داشت. همچنین هی<sup>۳</sup> و همکاران [۱۸] در بررسی رفتار یک پل متکی بر شمع و در معرض پدیده آب شستگی نشان دادند که با افزایش عمق آب شستگی، تغییر شکل‌ها و آسیب‌پذیری لرزه‌ای از ستون‌ها به ناحیه‌ای از شمع که فاقد تکیه‌گاه جانبی خاک می‌باشد، منتقل می‌شود.

بسیاری از محققین دیگر همچون لیا<sup>۴</sup> و همکاران [۲۰ و ۱۹]، گوا<sup>۵</sup> و همکاران [۲۱-۲۳] به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای پل‌های بتنی با پایه‌های در معرض آب شستگی، منحنی شکنندگی لرزه‌ای را در سطوح مختلف آسیب ارائه نمودند. نتایج مطالعات حاکی از آن بود که با افزایش عمق آب شستگی، ظرفیت تحمل بار جانبی کاهش یافته و پل نسبت به حوادث احتمالی زلزله آسیب‌پذیرتر می‌شود و احتمال شکست افزایش می‌یابد.

با وجود مطالعات قابل توجه ذکر شده، همچنان الگوی جامعی برای مدل‌سازی پل‌ها در برابر خطر سیلاب، که علاوه بر ساده بودن مدل‌سازی، مورد اتفاق نظر محققین باشد وجود ندارد. همچنین، در مطالعات گذشته، میزان حساسیت رفتار پل‌ها به هر یک از فرضیات مدل‌سازی و یا پارامترهای مرتبط با طراحی و ساخت پایه مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به اهمیت پل‌ها به عنوان مهم‌ترین نقاط گلوگاهی در شبکه‌های حمل و نقل و همچنین موارد متعدد خرابی گزارش شده در پل‌ها در اثر سیلاب در نقاط مختلف جهان، ارائه‌ی یک الگوی نظام‌مند جهت بررسی رفتار پل‌ها در برابر خطر سیلاب برای ارزیابی سریع وضعیت آن‌ها امری ضروری است. به همین منظور، در این مطالعه برای بررسی رفتار پل‌ها در برابر خرابی ناشی

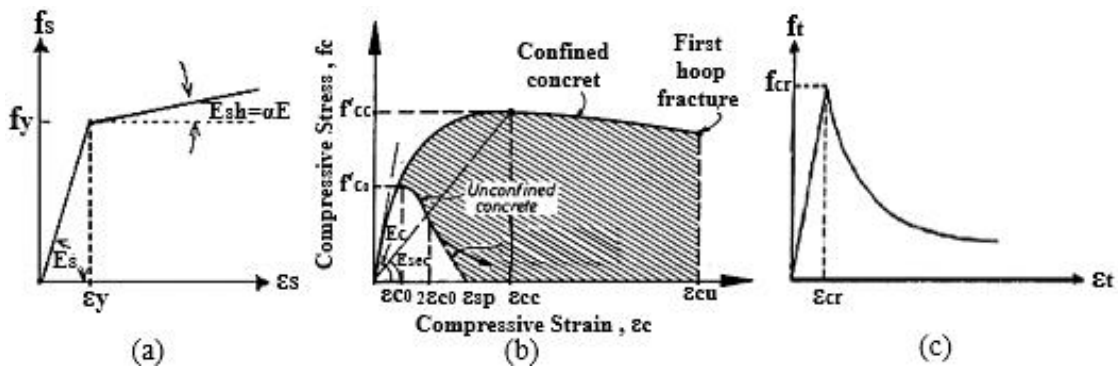
6 Concrete damaged plasticity (CDP)  
7 Abaqus  
8 Mander  
9 Modified Hognestad  
10 Belarbi  
11 Hsu  
12 Concrete smeared crack  
13 Brittle cracking

1 Avşar  
2 Klinga  
3 He  
4 Liao  
5 Guo



شکل ۱. مدل پایه پل سه بعدی غیرخطی در محیط اجزای محدود

Fig. 1. Nonlinear three-dimensional bridge pier model in finite element environment



شکل ۲. مدل تنش کرنش: (a) فولاد (b) بتن در فشار در ناحیه‌ی محصور شده (c) بتن در کشش [۲۴ و ۲۶]

Fig. 2. Strain stress model: a) Steel b) Concrete in pressure in the enclosed area c) Concrete in tension

ترتیب کرنش در ماکزیمم تنش محصور شده و محصور نشده‌ی بتن،  $E_c$  مدول الاستیسیته بتن،  $\epsilon_{cu}$  کرنش نهایی بتن محصور شده،  $f_{cr}$  و  $\epsilon_{cr}$  به ترتیب تنش و کرنش ترک خوردگی بتن در کشش می‌باشند.

## ۲-۲- مدل عکس‌العمل خاک و شمع

شبیه‌سازی صحیح عکس‌العمل متقابل شمع و خاک یک عامل مهم موثر بر موفقیت شبیه‌سازی رفتار پایه‌های پل در معرض پدیده آب شستگی تحت شرایط سیلاب می‌باشد. شبیه‌سازی خاک به صورت یک محیط پیوسته

تا در پژوهش حاضر نیز مورد استفاده قرار گیرد و نتایج قابل قبولی برای مدل‌های صحت‌سنجی حاصل گردد. برای اعمال خواص فولاد نیز از مدل رایج الاستیک - پلاستیک دوخطی استفاده شده است. در این مدل، منحنی تنش - کرنش فولاد در ناحیه پس از تسلیم، دارای شیبی برابر با ۱ درصد مدول الاستیسیته فولاد می‌باشد. شکل ۲ مدل تنش-کرنش مصالح فولاد و بتن در فشار و کشش را نشان می‌دهد که در آن  $f_y$  تنش تسلیم فولاد،  $E_s$  کرنش تسلیم فولاد،  $E_c$  مدول الاستیسیته فولاد،  $f'_{cc}$  و  $f'_{c0}$  به ترتیب مقاومت فشاری بتن محصور شده و محصور نشده در فشار،  $\epsilon_{cc}$  و  $\epsilon_{c0}$  به

و سرعت متوسط جریان تعیین می‌گردد. سپس بار ناشی از جریان در جهت طولی بر روی پایه‌های پل، مطابق با آیین‌نامه پل‌های بزرگراهی آشتو<sup>۵</sup> [۳۳] محاسبه می‌شود. توزیع جریان بر روی پایه پل به صورت مثلثی فرض می‌گردد، به نحوی که سطح آب دارای حداکثر مقدار فشار جریان  $2P_{ave}$  بوده و فشار به صورت خطی با تغییر عمق جریان تا کف بستر به صفر کاهش می‌یابد [۹ و ۸ و ۱]. رابطه مانینگ و محاسبه فشار جریان در روابط (۳)، (۴) و (۵) ارائه شده است.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (۳)$$

$$Q = AV_{ave} \quad (۴)$$

$$P_{ave} = 0.52 C_D (V_{ave})^2 \quad (۵)$$

در این معادلات،  $Q$  دبی جریان،  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $S$  شیب طولی کف بستر،  $R$  شعاع هیدرولیکی،  $A$  سطح مقطع جریان،  $P_{ave}$  فشار متوسط جریان آب،  $V_{ave}$  سرعت متوسط جریان و  $C_D$  ضریب درگ<sup>۶</sup> می‌باشد. ضریب درگ به منظور اعمال تاثیر شکل پایه در نظر گرفته شده و برای پایه‌های با گوشه‌های مربعی برابر  $1/4$ ، پایه‌های دایره‌ای  $0/7$ ، پایه‌های در معرض تجمع ضایعات و زبالجات  $1/4$  و پایه‌های گوشه‌دار با زاویه کمتر از  $90$  درجه برابر  $0/8$  می‌باشد [۳۳].

## ۲-۴- محاسبه عمق آب شستگی

در این مطالعه، به منظور تخمین عمق آب شستگی موضعی، از معادلات ارائه شده در دستورالعمل ارزیابی آب شستگی پل‌ها که توسط اداره بزرگراه‌های آمریکا منتشر شده، استفاده می‌شود [۶]. در این روش، برای محاسبه عمق آب شستگی کل، مطابق با روابط (۶) تا (۹)، اثرات آب شستگی مرتبط با پایه، سرشمع و شمع با هم جمع می‌گردد.

$$y_s = y_{spier} + y_{spc} + y_{spg} \quad (۶)$$

با المان‌های مکعبی، راه حل مستقیم مناسبی به نظر می‌رسد. با این وجود، به دلیل هزینه‌ی بالای محاسباتی این روش، عموماً برای مدل‌سازی کامل پل و پایه‌ها در مواجهه با شرایط مختلف بارگذاری سیلاب استفاده نمی‌گردد. به عنوان یک راه حل جایگزین، بسیاری از محققین برای تعامل خاک اطراف فونداسیون، مدل فنرهای غیرخطی وینکلر را پیشنهاد داده و روابطی را برای محاسبه سختی این فنرها ارائه نمودند که از آن جمله می‌توان به روابط ارائه شده توسط مت لاک<sup>۱</sup> [۲۷] و روابط انستیتوی نفت آمریکا<sup>۲</sup> [۲۸] بر مبنای مطالعات مورچیسون<sup>۳</sup> [۲۹] اشاره نمود که به ترتیب برای تعامل فونداسیون شمع مدفون در خاک چسبنده رس و خاک دانه‌ای استفاده می‌شود. هونگ و یائو [۸ و ۱]، کو و همکاران [۹] برای رفتار غیرخطی المان‌های افقی فنر، از معادلات ضریب عکس‌العمل افقی موجود در آیین‌نامه ژاپن [۳۱ و ۳۰] استفاده نمودند که از نتایج ۴۱۵ تست بارگذاری افقی حاصل شده و در روابط (۱) و (۲) ارائه شده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر نیز از همین معادلات به دلیل سادگی کاربرد و قابلیت بالای آن‌ها استفاده شده است.

$$k_{h0} = 0.34(\alpha E_0)^{1.1} D^{-0.31} (EI)^{-0.103} \quad S \leq S_0 \quad (۱)$$

$$k_h = k_{h0} \left( \frac{S}{S_0} \right)^{-0.5} \quad S > S_0 \quad (۲)$$

در این معادلات،  $k_h$  ضریب عکس‌العمل افقی،  $S$  جابجایی جانبی شمع و  $S_0$  جابجایی مرجع است که معمولاً برابر با  $1$  درصد قطر شمع پیشنهاد می‌شود.  $\alpha$  در شرایط معمول برابر با  $1$  و در شرایط لرزه‌ای برابر با  $2$  در نظر گرفته می‌شود.  $E_0$  مدول الاستیسیته‌ی خاک می‌باشد و می‌تواند با  $28N$  تقریب زده شود که  $N$  عدد آزمایش نفوذ استاندارد یا SPT خاک می‌باشد. در این معادله،  $EI$  صلبیت خمشی شمع و  $D$  قطر شمع می‌باشند [۳۱ و ۳۰].

## ۲-۳- اعمال بار جریان

در الگوی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا با استفاده از رابطه مانینگ<sup>۴</sup> [۳۲]، به ازای هندسه مشخص مقطع جریان (شامل عرض مقطع جریان و عمق جریان)، ضریب زبری مانینگ و شیب طولی کف بستر، دبی

- 1 Matlock
- 2 American Petroleum Institute
- 3 Murchison
- 4 Manning

- 5 AASHTO
- 6 Drag coefficient



چرا که انتظار می‌رود خطاهای ناشی از کاربرد این معادلات در محدوده‌ی غیرمعتبر، تاثیر ناچیزی بر روی حساسیت‌سنجی رفتار پایه به عوامل مختلف سازه‌ای و ژئوتکنیکی داشته باشد.

### ۲-۵- المان‌های مورد استفاده و قیود

برای مدل‌سازی بتن، از المان نوع سه بعدی هشت گرهی (C3D8R) استفاده شد که هر گره دارای سه درجه آزادی می‌باشد. میلگردهای طولی و عرضی با کاربرد المان‌های خرپایی دو گرهی (T3D2) تعریف شدند. برای مدل‌سازی خاک اطراف شمع‌ها به کمک فنرهای وینکلر غیرخطی افقی، از المان‌های میله‌ای (wier) استفاده گردید که در طول شمع با فواصل مشخص، به کمک قید Tie به بدنه شمع متصل شدند. خواص آن‌ها به صورت محوری (Axial) در نرم‌افزار تعریف گردیده است؛ به نحوی که بر اساس رابطه (۱) و (۲)، سختی برای هر فنر، با اختصاص نیروی محوری و جابجایی به آن اعمال شده است و نتایج قابل قبولی برای مدل صحت‌سنجی مطابق با نتایج آزمایشگاهی حاصل گردید. همچنین برای تعریف اندرکنش میان بتن و میلگردها از مدل المان مدفون<sup>۱</sup> استفاده شد.

### ۳- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی مدل مورد استفاده در این پژوهش، از دو مطالعه‌ی مجزا با هدف بررسی درستی نتایج مرتبط با فنرهای جانبی مورد استفاده در مدل‌سازی تعامل شمع و خاک و نتایج مرتبط با شبیه‌سازی رفتار غیرخطی پایه‌ها در برابر بار جانبی استفاده گردید که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

#### ۳-۱- مدل‌سازی اجزای محدود آزمایش تک شمع مدفون در خاک

به منظور بررسی درستی نتایج مدل‌سازی در تخمین اندرکنش شمع و خاک اطراف آن با استفاده از روابط (۱) و (۲)، مطالعه آزمایشگاهی چاو<sup>۲</sup> و همکاران [۳۴] مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، یک نمونه تک شمع بتن مسلح مدفون در خاک غیرچسبنده تحت تست بار چرخه‌ای قرار گرفته و رفتار بار تغییر مکان جانبی این تک شمع ارزیابی گردید. مشخصات هندسی نمونه مدنظر با ارتفاع 2D بالای سطح زمین، مشخصات بتن با پوشش ۵۰ میلی‌متر، مشخصات آرماتورهای طولی از نوع A706 و آرماتورهای عرضی از نوع MW25 و گام ۵۰ میلی‌متر و مشخصات خاک مدنظر به ترتیب در شکل ۳ و جداول ۱، ۲ و ۳ ذکر شده است.

$$\frac{y_{spier}}{y_1} = K_{hpier} \left[ 2k_1 k_2 k_3 \left( \frac{a_{pier}}{y_1} \right)^{0.65} \left( \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \right)^{0.43} \right] \quad (7)$$

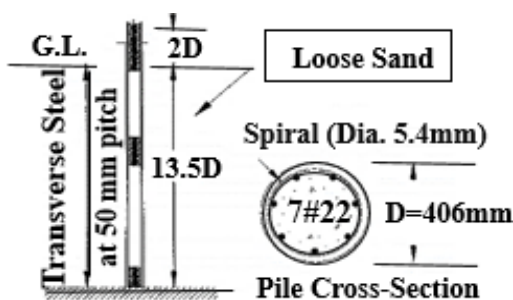
$$\frac{y_{spc}}{y_2} = \left[ 2k_1 k_2 k_3 k_w \left( \frac{a_{pc}^*}{y_2} \right)^{0.65} \left( \frac{V_2}{\sqrt{gy_2}} \right)^{0.43} \right] \quad (8)$$

$$\frac{y_{spg}}{y_3} = K_{hpg} \left[ 2k_1 k_2 k_3 \left( \frac{a_{pg}^*}{y_3} \right)^{0.65} \left( \frac{V_3}{\sqrt{gy_3}} \right)^{0.43} \right] \quad (9)$$

در این معادلات،  $y_s$  عمق کل آب شستگی،  $y_{spier}$ ،  $y_{spc}$  و  $y_{spg}$  به ترتیب عمق آب شستگی ناشی از قرارگیری پایه، سرشمع و گروه شمع در مسیر جریان،  $a_{pier}$  قطر پایه،  $y_1$  و  $V_1$  به ترتیب عمق و سرعت جریان در بالادست پایه می‌باشند.  $k_1$  ضریب تصحیح اثر شکل نوک پایه،  $k_2$  ضریب تصحیح اثر زاویه برخورد جریان و  $k_3$  ضریب تصحیح برای شرایط بستر،  $k_w$  ضریب تصحیح برای پایه عریض،  $K_{hpier}$  ضریب تصحیح ارتفاع پایه بالای بستر،  $K_{hpg}$  ضریب ارتفاع گروه شمع‌ها،  $a_{pc}^*$  عرض پایه معادل واقع در جریان آب،  $a_{pg}^*$  عرض موثر معادل شمع‌ها،  $y_2$  عمق جریان برای محاسبات سرشمع،  $V_2$  سرعت جریان برای محاسبات سرشمع،  $y_3$  عمق جریان برای محاسبات گروه شمع،  $V_3$  سرعت جریان برای محاسبات گروه شمع می‌باشند که از روابط ارائه شده در دستورالعمل ارزیابی آب شستگی پل‌ها محاسبه می‌گردند [۶]. شایان ذکر است که در این معادلات فرض گردیده است که قطر متوسط ذرات در محدوده‌ی کمتر از ۲ میلی‌متر بوده و در این محدوده، عمق آب شستگی طبق معادلات، به نوع خاک حساس نمی‌باشد. بررسی محدوده‌ی دقیق اعتبار این معادلات و در نظر گرفتن خطاهای مرتبط با آن، مستلزم بررسی‌های جامع‌تری می‌باشد. با این وجود در این پژوهش معادلات فوق در محدوده‌ی پارامترهای مورد بررسی، معتبر فرض گردیده است؛

1 Embedded

2 Chai



شکل ۳. جزئیات هندسی نمونه شمع آزمایش شده توسط چاو و همکاران [۳۴]

Fig. 3. Geometric details of pile tested by Chao et al

جدول ۱. مشخصات بتن در تک شمع بتنی آزمایش شده توسط چاو و همکاران [۳۴]

Table 1. Specifications of concrete in a single concrete pile tested by Chao et al

مقاومت فشاری بتن (MPa)	ضریب پواسون	جرم مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )
۴۱	۰/۲	۲۴۰۰

جدول ۲. مشخصات فولاد در تک شمع بتنی آزمایش شده توسط چاو و همکاران [۳۴]

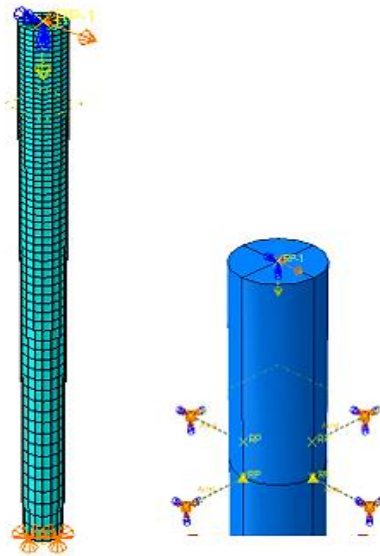
Table 2. Steel specifications in single concrete piles tested by Chao et al

نوع آرماتور	درصد آرماتور (%)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	جرم مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )
آرماتور طولی	۲/۱	۴۲۱	۰/۳	۷۸۵۰
آرماتور عرضی	۰/۵۷	۷۱۰	۰/۳	۷۸۵۰

جدول ۳. مشخصات خاک در تک شمع بتنی آزمایش شده توسط چاو و همکاران [۳۴]

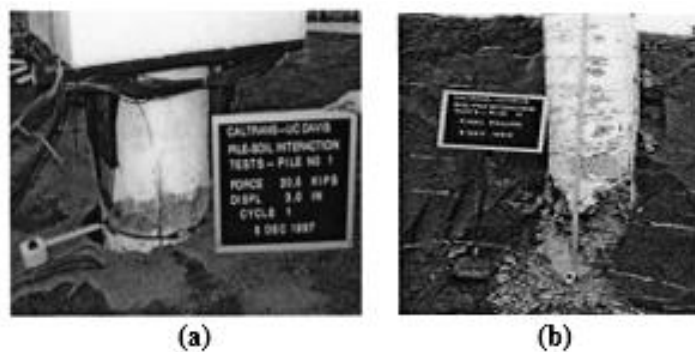
Table 3. Soil profile in a single concrete pile tested by Chao et al

نوع خاک	متوسط اندازه دانه‌ها (mm)	چگالی نسبی (%)	زاویه اصطکاک (deg)
Loose	۰/۵ – ۰/۶	۵۳	۳۷



شکل ۴. نحوه اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در مدل اجزای محدود

Fig. 4. Apply boundary conditions and loading in the finite element model



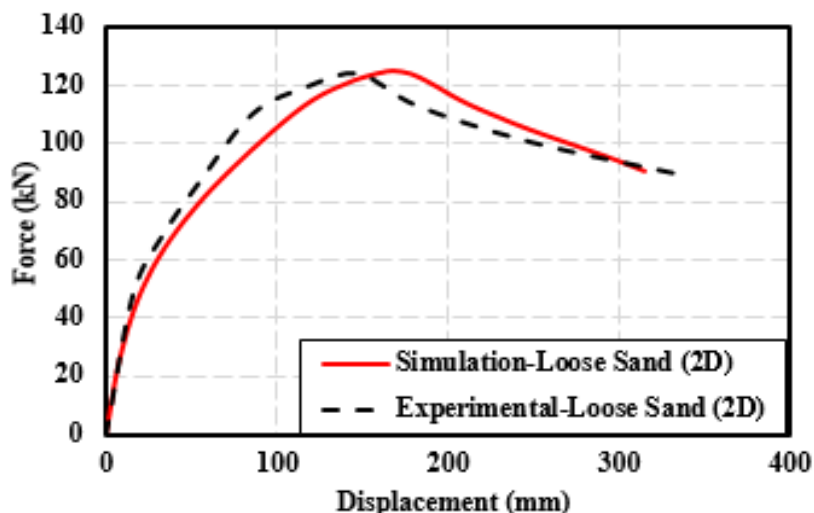
شکل ۵. (a) شکاف در خاک (b) شکست نهایی نمونه شمع در آزمایش انجام شده توسط چاو و همکاران [۳۴]

Fig. 5. a) Gap in the soil b) Final failure of the pile sample in an experiment performed by Chao et al

تکیه‌گاهی و مش‌بندی نشان داده شده است. افزایش تغییر مکان در بالای شمع، منجر به تشکیل مفصل پلاستیک در زیر سطح زمین گردید و یک شکاف نسبتاً بزرگ در خاک اطراف شمع ایجاد شد. شکل ۵، شکاف ایجاد شده در خاک و خرابی در نمونه شمع بتنی در اثر بارگذاری، در عمق  $3.3D$  زیر سطح زمین در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶ نمودار بار- تغییر مکان نمونه شمع بتنی، حاصل از نرم‌افزار اجزای محدود و آزمایش چاو را نشان می‌دهد و گویای تطابق مناسب بین نتایج حاصل از نرم‌افزار و نتایج آزمایشگاهی می‌باشند.

با توجه به زاویه اصطکاک داخلی و چگالی نسبی خاک موجود در آزمایشگاه و بر مبنای مطالعات لوک [۳۵]، عدد SPT برای خاک دانه‌ای مدنظر برابر ۱۵ در نظر گرفته شد. نمونه تحت بار محوری ۴۴۵ کیلو نیوتن قرار گرفت و نیروی جانبی به صورت کنترل تغییر مکان در نظر گرفته شد و جابجایی جانبی معادل ۳۴۰ میلی‌متر در بالای شمع اعمال گردید. همچنین با انجام آنالیز حساسیت شبکه‌بندی‌های مختلف در محدوده ابعاد مش ۳۰ تا ۸۰ میلی‌متر، شبکه‌ای بهینه و با دقت قابل قبول با ابعاد ۴۰ میلی‌متر انتخاب شده است. در شکل ۴ کاربرد فنر وینکلر غیرخطی، نحوه بارگذاری و شرایط





شکل ۶. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه شمع در حالت آزمایشگاهی و تحلیل نرم افزار

Fig. 6. Comparison of load-lateral displacement curve of pile samples in laboratory mode and software analysis

جدول ۴. جزئیات نمونه ستون بتن مسلح در آزمایش پالتر و همکاران [۳۶]

Table 4. Details of reinforced concrete column samples in Palter et al

نمونه	قطر مقطع دایره‌ای (mm)	قطر هسته بتنی (mm)	فاصله تنگ‌ها (mm)	درصد آرماتور طولی (%)	درصد آرماتور عرضی (%)
S75P10C0	۳۰۵	۲۶۰	۷۵	۲/۵	۲/۲

جدول ۵. مشخصات فولاد در آزمایش تک ستون بتن مسلح پالتر و همکاران [۳۶]

Table 5. Specifications of steel in the single-column test of reinforced concrete Palter et al

نوع آرماتور	سایز آرماتور	تنش تسلیم (MPa)	کرنش تسلیم	تنش نهایی (MPa)
آرماتور طولی	20M	۴۱۵	۰/۰۰۲۳	۶۱۵
آرماتور عرضی	10M	۴۷۰	۰/۰۰۲۲	۵۷۳

$0.1A_g f'_c$  و بارگذاری جانبی چرخه‌ای در آزمایشگاه، مشخصات میلگردها

و بتن در جدول ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

نیروی جانبی به صورت کنترل تغییر مکان در محیط اجزای محدود در نظر گرفته شده و جابجایی جانبی معادل ۱۹۴ میلی‌متر در بالای ستون اعمال گردید. صلبیت بسیار بالای فونداسیون بتنی و ضخامت برابر ۵۰۰ میلی‌متر، موجب شد تا شرایط تکیه‌گاهی در نرم‌افزار کاملاً گیردار فرض

۳-۲- مدل‌سازی اجزای محدود آزمایش تک ستون بتنی

به منظور بررسی عملکرد مناسب مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن و فولاد و تعامل بین آنها، آزمایش پالتر<sup>۱</sup> و همکاران [۳۶] با کاربرد روش مدل‌سازی معرفی شده در این مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت. جزئیات هندسه تک ستون دایره‌ای بتن مسلح تحت بار محوری ثابت

1 Paultre

جدول ۶. جزئیات بتن در آزمایش تک ستون بتن مسلح پالتر و همکاران [۳۶]

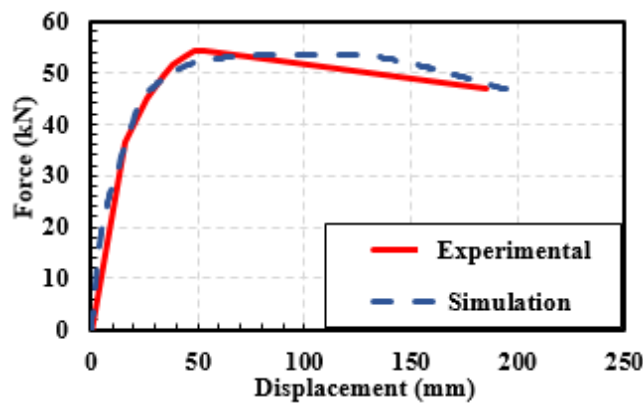
Table 6. Specifications of Concrete in the single-column test of reinforced concrete Palter et al

جرم مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	حداکثر تنش فشاری بتن (MPa)
۲۴۰۰	۰/۲	۳۲/۶



شکل ۷. خرابی نمونه ستون بتنی در اثر بارگذاری در آزمایش پالتر و همکاران [۳۶]

Fig. 7. Concrete column failure due to loading in Palter experiment

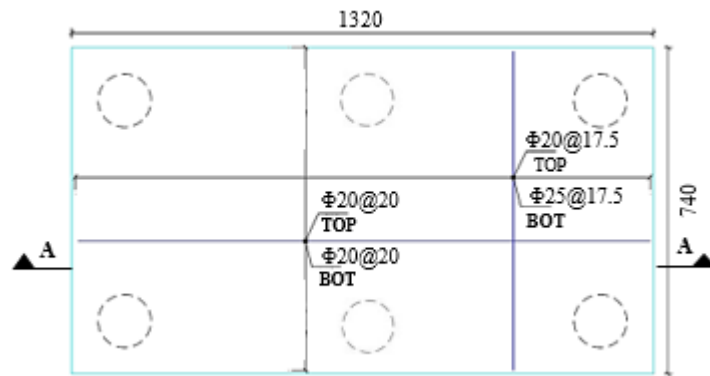


شکل ۸. مقایسه نمودار بار - تغییر مکان جانبی نمونه ستون بتنی در حالت آزمایشگاهی و تحلیل نرم افزار

Fig. 8. Comparison of load-lateral displacement curve of concrete column sample in laboratory mode and software analysis

شکل ۷ خرابی ایجاد شده در پای ستون بتنی در اثر اعمال بار محوری و افزایش جابجایی جانبی در آزمایش پالتر و همکاران نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ نمودار بار- تغییر مکان جانبی ستون بتنی، حاصل از مدل اجزای محدود و آزمایش نشان داده شده است و گویای انطباق مناسب بین این نتایج می باشد.

گردد. برای رسیدن به شبکه بندی مناسب، تحلیل های متعددی با ابعاد مش ۲۰ تا ۶۰ میلی متر انجام شد و نتایج به دست آمده از آنالیز، تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است. در نهایت به منظور کاهش زمان آنالیز، ابعاد مش با دقت قابل قبول معادل ۳۰ میلی متر انتخاب گردید. در ادامه نتایج انجام آزمایش توسط پالتر و همکاران و نتایج حاصل از مدل اجزای محدود ارائه می گردد. در



شکل ۹. مشخصات هندسه و آرماتورگذاری سرشمع پل موجود

Fig. 9. Specifications of geometry and reinforcement of existing bridge pilecap

فشار به پایه‌ها اعمال گردید. در نهایت، مجموع عکس‌العمل نیروهای موجود در فنرهای جانبی به عنوان بار و تغییر مکان بالای پایه به عنوان تغییر مکان مرجع در نظر گرفته شده و رفتار بار-تغییر مکان در شرایط مختلف پارامترهای سازه‌ای شامل مقاومت فشاری بتن و تنش تسلیم فولاد، پارامتر ژئوتکنیکی عدد SPT خاک، پارامترهای هیدرولیکی شامل ضریب زبری مانینگ و شیب طولی کف بستر ارزیابی گردید.

#### ۴-۱- پارامترهای سازه‌ای

#### ۴-۱-۱- اثر مقاومت فشاری بتن

بر مبنای مطالعات اونانوا<sup>۳</sup> و ماهان<sup>۴</sup> [۳۸]، مقاومت فشاری بتن با توزیع نرمال و ضریب تغییرات برابر ۰/۱۹ قابل فرض می‌باشد. با تغییر به اندازه‌ی یک انحراف معیار ( $\pm\sigma$ ) از مقدار میانگین مقاومت ۲۴ مگاپاسکال، رفتار بار-تغییر مکان سازه در دو مقاومت فشاری ۱۹/۴۴ و ۲۸/۵۶ مگاپاسکال در شرایط هیدرولیکی و ژئوتکنیکی مطابق جداول ۸ و ۹ بررسی گردید. لازم به ذکر است که با تغییر خواص بتن، به دلیل تغییر در صلبیت خمشی شمع، رفتار فنرهای وینکلر نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. شکل ۱۲ نمودار بار-تغییر مکان سازه را در سه شرایط مختلف مقاومت فشاری نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که کاهش مقاومت فشاری بتن از ۲۴ به ۱۹/۴۴ مگاپاسکال، منجر به کاهش ظرفیت سازه می‌گردد و در نتیجه تغییر مکان بالای پایه، به میزان ۱۳ درصد افزایش می‌یابد و افزایش مقاومت فشاری بتن به میزان یک انحراف معیار از حالت متوسط، تغییر مکان بالای پایه را به میزان ۹

#### ۴- مطالعه موردی مدل‌سازی پایه پل موجود تحت بار سیلاب

با توجه به الگوی شبیه‌سازی معرفی شده و با الهام از هندسه و مشخصات یک پل موجود، یک پایه پل بتن مسلح در محیط اجزای محدود شبیه‌سازی گردید. این سازه متشکل از سه ستون دایره‌ای، سرشمع و شش شمع دایره‌ای بتن مسلح مدفون در خاک می‌باشد. در طراحی این پل، ۲ متر عمق هواکش برای جریان آب فرض گردیده بود. با توجه به توصیه‌های چو<sup>۱</sup> [۳۷]، مقدار ضریب زبری مانینگ برای بستر رودخانه در شرایط سیلاب برابر ۰/۰۲۵ فرض گردید. مصالح بستر از نوع خاک دانه‌ای متوسط<sup>۲</sup> فرض شد. سایر مشخصات هندسه و مصالح، مشخصات هیدرولیکی جریان و مشخصات ژئوتکنیکی در حالت میانگین در شکل‌های ۹ تا ۱۱ و جدول‌های ۷، ۸ و ۹ بیان شده است. ابعاد هندسه پل در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ برحسب سانتی‌متر می‌باشد.

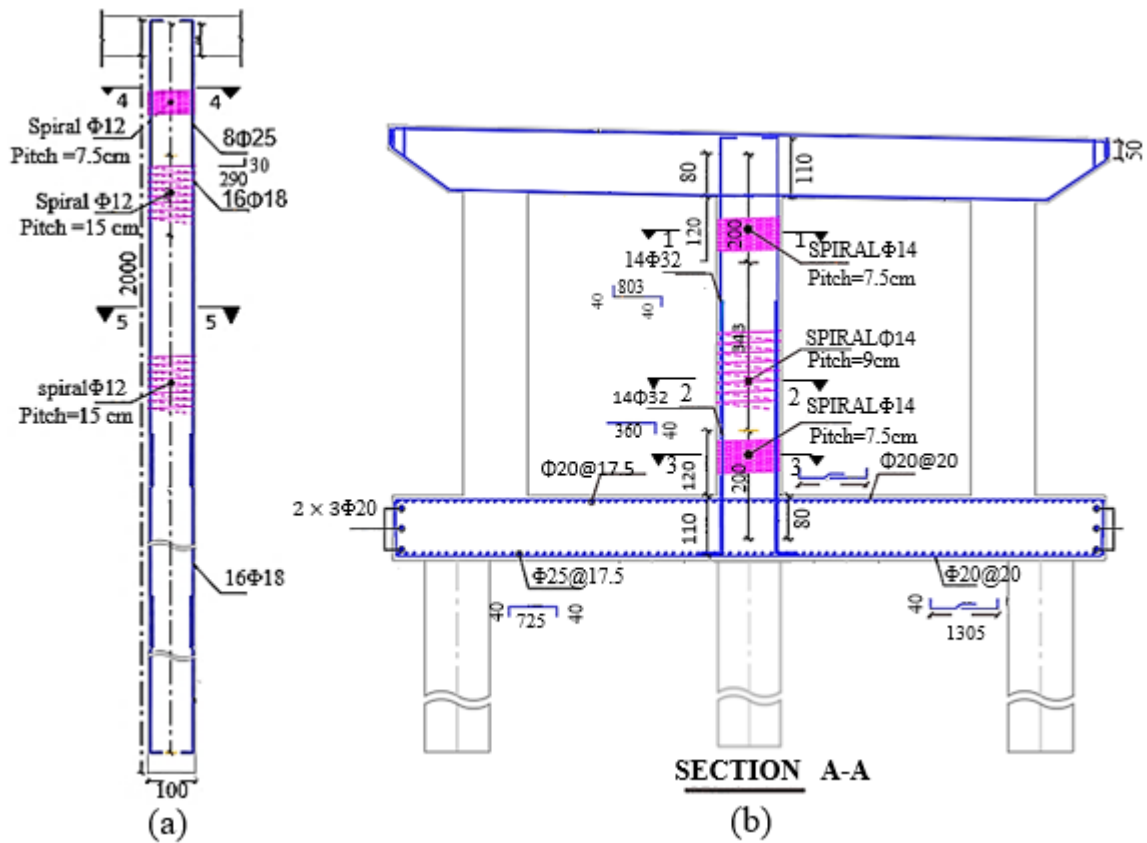
تراز کف بستر اولیه زمین قبل از پدیده‌ی آب شستگی، متناظر با کف سرشمع فرض گردید. با توجه به جزئیات پل‌های مورد کاربرد در منطقه‌ی شمال ایران، نحوه‌ی قرارگیری پل مورد بررسی، عمود بر جریان فرض شده و زاویه برخورد جریان به پایه‌ها صفر در نظر گرفته شد. عمق آب شستگی با استفاده از روابط بخش ۲-۴ محاسبه گردیده و سختی فنرهای وینکلر غیرخطی در ناحیه آب شسته برابر صفر قرار داده شد. همچنین بار ثقلی متناظر با کاربری پل معادل با ۷۰۰ تن اعمال شده و بار ناشی از جریان سیلاب با در نظرگیری عمق آب شستگی، طبق رابطه (۵) به صورت

3 Unanwa

4 Mahan

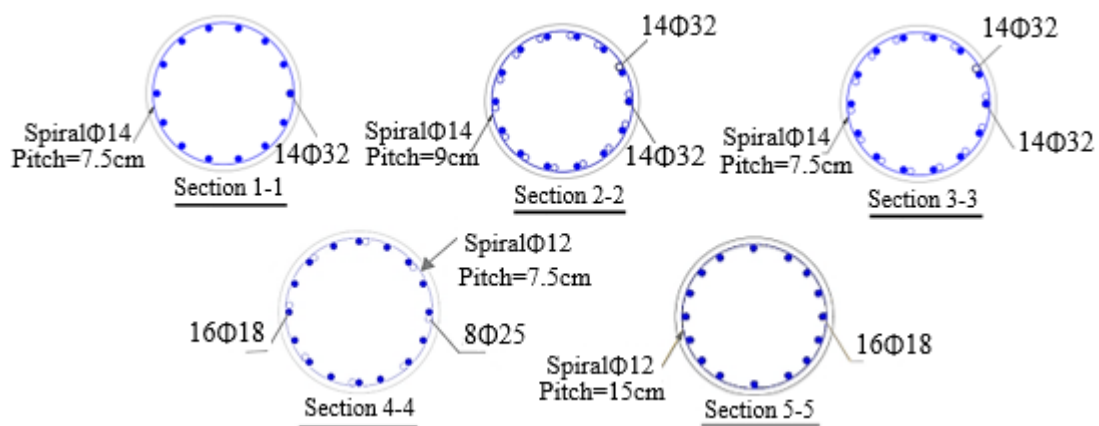
1 Chow

2 Medium Sand



شکل ۱۰. مشخصات هندسه و آرماتورگذاری (a) شمع (b) پایه‌های پل موجود

Fig. 10. Geometry and reinforcement specifications a) Pile b) Existing bridge piers



شکل ۱۱. مشخصات آرماتورگذاری مقاطع مختلف پایه‌ها و شمع

Fig. 11. Reinforcement specifications of different sections of piers and piles

جدول ۷. مشخصات هندسه سازه

Table 7. Structural dimensions

جزء	طول (mm)	قطر (mm)	آرماتور طولی (mm)	آرماتور عرضی (mm)	تنش تسلیم فولاد (MPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)
ستون	۵۸۳۰	۱۲۰۰	۱۴ Φ ۳۲	Φ ۱۴ at ۹۰	۴۰۰	۲۴
سر شمع	۷۴۰۰×۱۳۲۰۰	۱۲۰۰	Φ ۲۰ at ۲۰۰	Φ ۲۰ at ۱۷۵	۴۰۰	۲۴
شمع	۲۰۰۰۰	۱۰۰۰	۱۶ Φ ۱۸	Φ ۱۲ at ۱۵۰	۴۰۰	۲۴

جدول ۸. مشخصات هیدرولیکی جریان

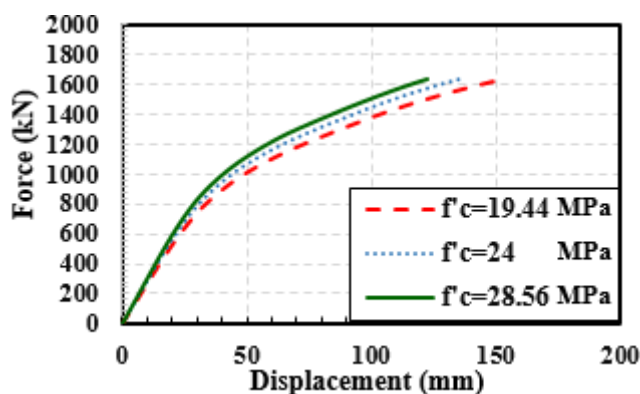
Table 8. Hydraulic profile of the flow

عمق کل آب شستگی (m)	سرعت جریان (m/s)	دبی جریان (m <sup>3</sup> /s)	عرض جریان (m)	شیب کف بستر	زبری مانینگ	عمق جریان از کف (m)	عمق هواکش (m)
۷/۷۱	۷/۶۶	۳۲۴۳	۶۸	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵	۶/۲۳	۲

جدول ۹. مشخصات ژئوتکنیکی

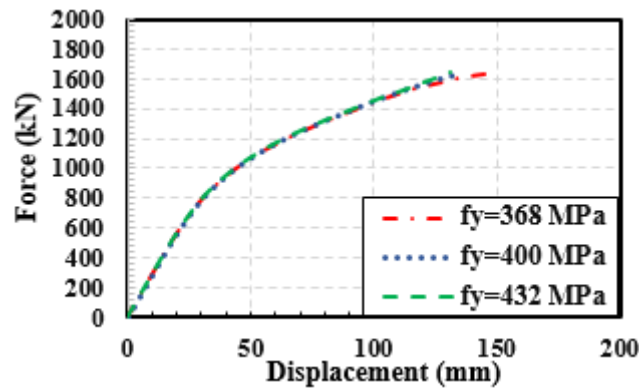
Table 9. Geotechnical specifications

عمق لایه‌ها (m)	۰-۵	۵-۱۰	۱۰-۱۵	۱۵-۲۰
عدد SPT	۱۵	۱۷	۱۹	۲۱



شکل ۱۲. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان سازه برای مقادیر مختلف مقاومت فشاری بتن

Fig. 12. Comparison of load-displacement curves of structures for different values of compressive strength of concrete



شکل ۱۳. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان سازه برای مقادیر مختلف تنش تسلیم فولاد

Fig. 13. Comparison of load-displacement curves of structures for different values of steel yield stress

مبنا برای هر لایه خاک دانه‌ای متوسط، ضریب تغییرات مذکور اعمال شده و با اعمال تفاوت یک انحراف معیار ( $\pm\sigma$ )، دو نوع خاک دیگر در رده خاک دانه‌ای سست<sup>۵</sup> و خاک دانه‌ای متراکم<sup>۶</sup> مطابق با جدول ۱۰ حاصل شده است. سازه در سه شرایط ژئوتکنیکی فوق، برای پارامترهای سازه‌ای و هیدرولیکی مطابق جداول ۷ و ۸ بررسی می‌گردد. شکل ۱۴ نمودار بار- تغییر مکان سازه را تحت بار سیلاب نشان می‌دهد. به طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، رفتار سازه حساسیت قابل توجهی به شرایط ژئوتکنیکی دارد؛ به طوری که در شرایط خاک سست‌تر، تغییر مکان بالای پایه ۱/۸۷ برابر مقدار متوسط می‌باشد.

#### ۳-۴- پارامترهای هیدرولیکی

#### ۳-۴-۱- اثر ضریب زبری مانینگ

به منظور بررسی تاثیر ضریب زبری مانینگ بستر بر روی پاسخ سازه تحت بار جانبی سیلاب، از توزیع نرمال ارائه شده توسط سزارا [۴۱]، با ضریب تغییرات ۰/۱۵ برای ضریب زبری استفاده گردید. دبی جریان معادل ۳۲۴۳ متر مکعب بر ثانیه، به عنوان مقدار ثابت فرض گردید و با اعمال تفاوت یک انحراف معیار ( $\pm\sigma$ ) برای مقدار میانگین ضریب زبری ۰/۰۲۵، ضرایب زبری مانینگ ۰/۰۲۱ و ۰/۰۲۹ و سایر پارامترهای هیدرولیکی مطابق جدول ۱۱ محاسبه گردید. سایر پارامترهای سازه‌ای و ژئوتکنیکی مطابق

درصد کاهش می‌دهد.

#### ۴-۱-۲- اثر تنش تسلیم فولاد

بر مبنای مطالعات الینگ‌وود<sup>۱</sup> و هوانگ<sup>۲</sup> [۳۹]، برای تنش تسلیم فولاد توزیع لوگ نرمال با ضریب تغییرات برابر ۰/۰۸ پیشنهاد شده است. با تفاوت یک انحراف معیار ( $\pm\sigma$ ) از مقدار میانگین تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال، سازه در دو تنش تسلیم دیگر برابر با ۳۶۸ و ۴۳۲ مگاپاسکال در شرایط هیدرولیکی و ژئوتکنیکی مطابق جداول ۸ و ۹ بررسی می‌شود. شکل ۱۳ پاسخ سازه را در سه شرایط مختلف تنش تسلیم فولاد نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است، رفتار پایه در برابر سیلاب تحت تاثیر تنش تسلیم فولاد قرار می‌گیرد؛ ولی حساسیت رفتار به تنش تسلیم، با تغییر به میزان یک انحراف معیار قابل توجه نمی‌باشد؛ به نحوی که در صورت کاربرد فولاد با تنش تسلیم ۳۶۸ مگاپاسکال، تغییر مکان بالای پایه نسبت به حالت میانگین به میزان ۷ درصد افزایش می‌یابد.

#### ۴-۲- پارامتر ژئوتکنیکی

#### ۴-۲-۱- اثر عدد SPT خاک

فون<sup>۳</sup> و کلاهوی<sup>۴</sup> [۴۰] با انجام تست‌های متعدد بر روی خاک‌های دانه‌ای، برای SPT خاک ضریب تغییرات ۰/۵۴ را پیشنهاد داده‌اند. بر این

- 1 Ellingwood
- 2 Hwang
- 3 Phoon
- 4 Kulhawy

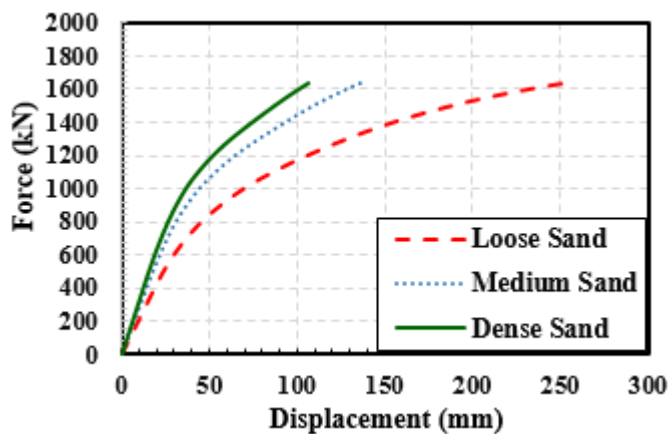
- 5 Loose Sand
- 6 Dense Sand
- 7 Cesare



جدول ۱۰. مشخصات ژئوتکنیکی به ازای تعداد SPT مختلف

Table 10. Geotechnical specifications for different number of SPT

عمق لایه‌ها (m)	SPT		
	شرایط ۱ دانه‌ای سست	شرایط ۲ دانه‌ای متوسط	شرایط ۳ دانه‌ای متراکم
۰-۵	۷	۱۵	۲۳
۵-۱۰	۸	۱۷	۲۶
۱۰-۱۵	۹	۱۹	۲۹
۱۵-۲۰	۱۰	۲۱	۳۳



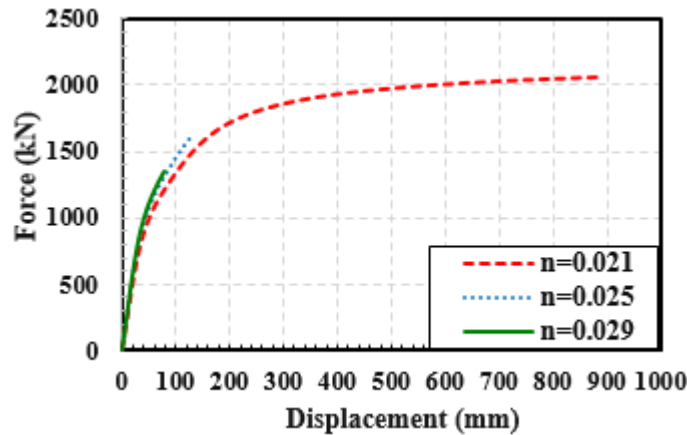
شکل ۱۴. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان سازه برای مقادیر مختلف عدد SPT خاک

Fig. 14. Comparison of load-displacement curves of structures for different soil conditions

جدول ۱۱. مشخصات هیدرولیکی جریان به ازای ضرایب زبری مانینگ مختلف

Table 11. Hydraulic profile of flow for different Manning roughness coefficients

دبی جریان (m <sup>3</sup> /s)	عمق جریان از کف (m)	زبری مانینگ	شیب کف بستر	عرض جریان (m)	سرعت جریان (m/s)	عمق کل آب شستگی (m)
۳۲۴۳	۵/۶۲	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴	۶۸	۸/۴۹	۸/۱۸
۳۲۴۳	۶/۲۳	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴	۶۸	۷/۶۶	۷/۷۱
۳۲۴۳	۶/۸۱	۰/۰۲۹	۰/۰۰۴	۶۸	۷	۷/۳۲



شکل ۱۵. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان سازه برای مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ

Fig. 15. Comparison of load-displacement curves of structures for different values of Manning roughness coefficient

جدول ۱۲. مشخصات هیدرولیکی جریان به ازای مقادیر مختلف شیب طولی کف بستر

Table 12. Hydraulic profile of the flow for different values of the longitudinal slope of the riverbed

دبی جریان (m <sup>3</sup> /s)	عمق جریان از کف (m)	زبری مانینگ	شیب کف بستر	عرض جریان (m)	سرعت جریان (m/s)	عمق کل آب شستگی (m)
۳۲۴۳	۶/۸۳	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۶۸	۶/۹۸	۷/۳۱
۳۲۴۳	۶/۲۳	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴	۶۸	۷/۶۶	۷/۷۱
۳۲۴۳	۵/۸	۰/۰۲۵	۰/۰۰۵	۶۸	۸/۰۳	۸/۲۲

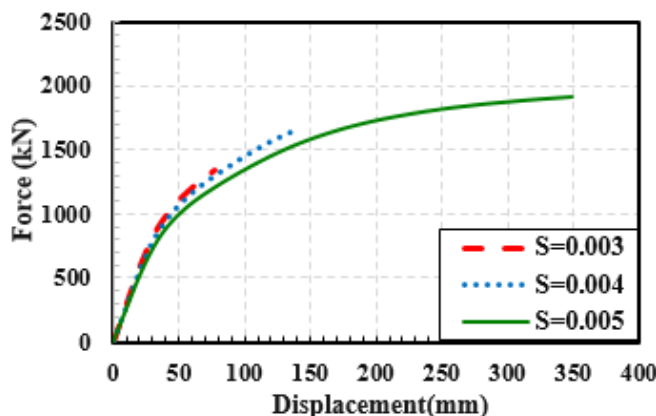
#### ۴-۳-۲- اثر شیب طولی کف بستر

جانسون<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۶ [۴۲] برای شیب طولی کف بستر توزیع لاگ نرمال با ضریب تغییرات ۰/۲۵ را پیشنهاد داد. برای شرایط هیدرولیکی میانگین و از جمله شیب کف بستر ۰/۰۰۴، دبی جریان برابر ۳۲۴۳ متر مکعب بر ثانیه محاسبه گردید. با در نظر گرفتن اختلاف یک انحراف معیار ( $\pm\sigma$ ) برای مقدار شیب کف بستر، سایر پارامترهای هیدرولیکی به ازای دبی مذکور و شیب‌های طولی ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۵ مطابق جدول ۱۲ محاسبه شده و سازه در دو شرایط هیدرولیکی دیگر، تحت پارامترهای میانگین سازه‌ای و ژئوتکنیکی مذکور در جداول ۷ و ۹ بررسی گردید.

شکل ۱۶ پاسخ سازه را در سه شرایط مختلف شیب طولی کف بستر نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که تغییر شیب کف بستر با

جداول ۷ و ۹ در نظر گرفته شد و پاسخ بار- تغییر مکان سازه ارزیابی گردید. نتیجه در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که تغییرات ضریب زبری مانینگ می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر روی نتایج بگذارد، چرا که این ضریب هم بر روی عمق آب شستگی و هم سرعت جریان آب اثرگذار بوده و در نتیجه نیروی وارد بر پایه را در سیلاب به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مطالعه‌ی موردی حاضر مشاهده می‌گردد که کاهش ضریب زبری مانینگ از ۰/۰۲۵ به ۰/۰۲۱، می‌تواند به افزایش عمق آب شستگی، افزایش سرعت و نیروی وارد بر پایه، تغییر شکل‌های غیرخطی قابل توجه و تغییر مکان بسیار چشم‌گیر پایه در برابر سیلاب منجر گردد. این مطلب، علاوه بر لزوم ارزیابی درست شرایط بستر در محاسبات سیلابی پایه‌ها، لزوم حفاظت از بستر رودخانه‌ها را برای کنترل آسیب به پل‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. مقایسه نمودار بار- تغییر مکان سازه برای مقادیر مختلف شیب طولی کف بستر

Fig. 16. Comparison of load-displacement curves of structures for different values of longitudinal slope of the riverbed

میزان یک انحراف معیار معادل  $4/56$  از مقدار متوسط  $24$  مگاپاسکال، جابجایی بالای پایه به ترتیب  $0/9$  و  $1/12$  برابر مقدار اولیه آن خواهد شد. همچنین چنانچه تنش تسلیم فولاد نیز به میزان یک انحراف معیار معادل  $32$  مگاپاسکال از مقدار متوسط  $400$  مگاپاسکال افزایش و کاهش یابد، تغییرات جابجایی جانبی سازه به ترتیب  $0/9$  و  $1/07$  برابر مقدار اولیه آن خواهد بود. از سوی دیگر، مشاهده شد که رفتار پایه حساسیت بسیار بیشتری به پارامترهای ژئوتکنیکی و هیدرولیکی داشته است. در بررسی تاثیر پارامتر ژئوتکنیکی، چنانچه نوع خاک براساس عدد SPT از خاک دانه‌ای متوسط به دانه‌ای متراکم و سست تغییر یابد، جابجایی سازه به ترتیب  $0/78$  و  $1/87$  برابر مقدار اولیه آن خواهد شد. به صورت مشابه، در بررسی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی مشاهده شد که چنانچه ضریب زبری مانینگ به میزان یک انحراف معیار معادل  $0/0375$  از مقدار متوسط  $0/025$  افزایش و کاهش یابد، جابجایی سازه به ترتیب به  $0/58$  و  $6/55$  برابر مقدار اولیه آن تغییر خواهد یافت. همچنین کاهش و یا افزایش شیب طولی کف بستر به میزان یک انحراف معیار معادل  $0/01$  از مقدار متوسط  $0/04$ ، جابجایی سازه را به ترتیب به میزان  $0/57$  و  $2/57$  برابر مقدار اولیه‌ی آن تغییر خواهد داد.

مشاهدات فوق، نشان می‌دهند که در بررسی رفتار پایه‌های پل در برابر پدیده‌ی سیلاب، ارزیابی مناسب شرایط ژئوتکنیکی و هیدرولیکی اهمیت قابل توجه دارد. همچنین، با کنترل مصالح کف بستر و به تبع آن ضریب زبری و یا اصلاح شیب بستر می‌توان تغییراتی اساسی در رفتار بار- تغییر مکان پایه‌ها در برابر سیلاب ایجاد نموده و آسیب‌پذیری آن‌ها را به میزان

توجه به اثرگذاری قابل ملاحظه بر سرعت جریان و به تبع آن، عمق جریان و عمق آب شستگی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نیروی وارد بر پایه داشته و می‌تواند جابجایی جانبی آن‌ها را در برابر سیلاب، به شدت تحت‌الشعاع قرار دهد. بر همین اساس، به نظر می‌رسد اصلاح شیب بستر، هر چند به مقدار نسبتاً کوچک  $0/01$ ، می‌تواند نگرانی از آسیب‌پذیری در برابر سیلاب را به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور بررسی کمی عوامل موثر بر رفتار پل‌های در معرض سیلاب و آب شستگی ناشی از آن، یک الگوی نظام‌مند معرفی گردید. در ابتدا یک مدل پایه پل در محیط اجزای محدود ایجاد شده و اثر خاک با کاربرد فنرهای غیرخطی شبیه‌سازی گردید. پدیده‌ی آب شستگی نیز به صورت حذف فنرهای مزبور در عمق محاسبه شده برای آب شستگی، در نظر گرفته شده است. مدل مزبور با استفاده از نتایج آزمایشگاهی پیشین بر روی شمع‌های تحت بار جانبی و ستون‌های بتن مسلح صحت‌سنجی شده است. نتایج نشان دهنده‌ی تطابق مطلوب بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی بوده و نمایانگر امکان کاربرد مدل مزبور برای مطالعات پارامتریک رفتار در برابر سیلاب می‌باشد. در ادامه، تاثیر پارامترهای سازه‌ای، ژئوتکنیکی و هیدرولیکی بر روی رفتار نیرو-جابجایی پایه بررسی گردید.

نتایج نشان دادند که رفتار پایه حساسیت قابل ملاحظه‌ای به پارامترهای سازه‌ای ندارد؛ به نحوی که با افزایش و کاهش مقاومت فشاری بتن به

$y_s$	عمق آب‌شستگی، m
$y$	عمق جریان، m
<b>علائم یونانی</b>	
$\mathcal{E}c$	کرنش در بتن
$\mathcal{E}s$	کرنش در فولاد
$\mathcal{E}cu$	کرنش نهایی بتن
$\sigma$	انحراف معیار

### منابع

- [1] C.-C. Hung, W.-G. Yau, Vulnerability evaluation of scoured bridges under floods, *Engineering Structures*, 132 (2017) 288-299.
- [2] K. Wardhana, F.C. Hadipriono, Analysis of recent bridge failures in the United States, *Journal of performance of constructed facilities*, 17(3) (2003) 144-150.
- [3] E.E.M. Diaz, F.N. Moreno, J. Mohammadi, Investigation of common causes of bridge collapse in Colombia, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 14(4) (2009) 194-200.
- [4] A. Kryżanowski, M. Brilly, S. Rusjan, S. Schnabl, Review Article: Structural flood-protection measures referring to several European case studies, *Natural hazards and earth system sciences*, 14(1) (2014) 135-142.
- [5] J.V. Klinga, A. Alipour, Assessment of structural integrity of bridges under extreme scour conditions, *Engineering Structures*, 82 (2015) 55-71.
- [6] L.A. Arneson, L.W. Zevenbergen, P.F. Lagasse, P.E. Clopper, Evaluating Scour at Bridges, *Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18)*. Publication No. FHWA-HIF-12-00, 2012.
- [7] C. Lin, C. Bennett, J. Han, R.L. Parsons, Integrated analysis of the performance of pile-supported bridges under scoured conditions, *Engineering structures*, 36 (2012) 27-38.
- [8] C.-C. Hung, W.-G. Yau, Behavior of scoured bridge piers subjected to flood-induced loads, *Engineering structures*, 80 (2014) 241-250.
- [9] Y.-Y. Ko, J.-S. Chiou, Y.-C. Tsai, C.-H. Chen, H. Wang, C.-Y. Wang, Evaluation of flood-resistant capacity of

قابل ملاحظه‌ای کنترل نمود. مدل ارائه شده در این مطالعه به عنوان یک الگوی مناسب برای بررسی رفتار پایه‌های پل در برابر سیلاب بوده و می‌توان از آن در بررسی‌های جامع‌تر، به خصوص تحلیل‌های احتمالاتی آسیب‌پذیری پایه‌ها به سیلاب استفاده نمود. شایان ذکر است که در بررسی‌های این مقاله، ابعاد ذرات خاک کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر فرض شد که برای این حالت، عمق آب شستگی به نوع خاک حساس نمی‌باشد. در صورتی که نوع خاک متفاوت باشد، ضروری است اثر تغییر نوع خاک بر روی عمق آب شستگی به نحو مناسبی در بررسی لحاظ گردد. همچنین به منظور ساده‌سازی، اثرات دینامیکی مرتبط با جریان سیلاب بر روی پایه مدنظر قرار نگرفت. انتظار می‌رود ساده‌سازی ذکر شده تاثیر قابل توجهی بر رفتار مقایسه‌ای مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش نداشته باشد؛ به همین دلیل نتایج ارائه شده در این پژوهش از نظر شناسایی عوامل مختلف تاثیرگذار بر روی رفتار پایه در برابر سیلاب معتبر می‌باشد، هر چند بررسی دقیق پاسخ سازه‌ای به سیلاب مستلزم لحاظ نمودن اثرات دینامیکی می‌باشد.

### ۶- فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$A$	سطح مقطع جریان، $m^2$
$a$	عرض (قطر) پایه، m
$C_D$	ضریب درگ
$D$	قطر شمع، cm
$E_0$	مدول الاستیسیته خاک، $kg/cm^2$
$EI$	صلبیت خمشی شمع، $kg.cm^2$
$E_s$	مدول الاستیسیته فولاد، $N/mm^2$
$E_c$	مدول الاستیسیته بتن، $N/mm^2$
$f_s$	تنش در میلگرد، $(MPa) N/mm^2$
$f_y$	تنش تسلیم میلگرد، $(MPa) N/mm^2$
$f^{cc}$	مقاومت فشاری بتن محصور شده، $(MPa) N/mm^2$
$f^{c0}$	مقاومت فشاری بتن محصور نشده، $(MPa) N/mm^2$
$k_h$	ضریب عکس‌العمل افقی، $kg/cm^3$
$n$	ضریب زبری مانینگ
$N$	عدد SPT خاک
$P_{ave}$	فشار متوسط جریان آب، kPa
$Q$	دبی جریان، $m^3/s$
$R$	شعاع هیدرولیکی جریان، m
$S$	شیب طولی کف بستر
$s$	جابجایی جانبی شمع، cm
$V$	سرعت جریان، m/s

- highway bridges considering scour effect, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136 (2020).
- [19] K.-W. Liao, N.-D. Hoang, J. Gitomarsono, A probabilistic safety evaluation framework for multi-hazard assessment in a bridge using SO-MARS learning model, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(3) (2018) 903-915.
- [20] K.-W. Liao, Y. Muto, J. Gitomarsono, Reliability analysis of river bridge against scours and earthquakes, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(3) (2018).
- [21] X. Guo, M. Badroddin, Z. Chen, Scour-dependent empirical fragility modelling of bridge structures under earthquakes, *Advances in Structural Engineering*, 22(6) (2019) 1384-1398.
- [22] X. Guo, Z. Chen, Lifecycle multihazard framework for assessing flood scour and earthquake effects on bridge failure, *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2(2) (2016) C4015004.
- [23] X. Guo, Y. Wu, Y. Guo, Time-dependent seismic fragility analysis of bridge systems under scour hazard and earthquake loads, *Engineering Structures*, 121 (2016) 52-60.
- [24] J.B. Mander, M.J. Priestley, R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of structural engineering*, 114(8) (1988) 1804-1826.
- [25] E. Hognestad, N.W. Hanson, D. McHenry, Concrete stress distribution in ultimate strength design, in: *Journal Proceedings*, 1955, pp. 455-480.
- [26] A. Belarbi, T.T. Hsu, Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete, *Structural Journal*, 91(4) (1994) 465-474.
- [27] H. Matlock, Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay, in: *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conferenc*, 1970, pp. 577-594.
- [28] A.P.I. (API), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, Washington, 1993.
- [29] M.W. O'Neill, J.M. Murchison, Evaluation of P-Y scoured bridges, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(1) (2014) 61-75.
- [10] F. Liang, H. Zhang, M. Huang, Influence of flood-induced scour on dynamic impedances of pile groups considering the stress history of undrained soft clay, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 96 (2017) 76-88.
- [11] X. Wang, B. Ji, A. Ye, Seismic Behavior of Pile-Group-Supported Bridges in Liquefiable Soils with Crusts Subjected to Potential Scour: Insights from Shake-Table Tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(5) (2020).
- [12] X.Wang, A.Ye, Y.Shang, L. Zhou, Shake-table investigation of scoured RC pile-group-supported bridges in liquefiable and nonliquefiable soils, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(11) (2019) 1217-1237.
- [13] H.S. Kızılduman, A.M. Yanmaz, A. Caner, Stability of bridge piers subjected to a probable flood event followed by a probable seismic event, *Journal of performance of constructed facilities*, 32(1) (2018) 1-8.
- [14] C.R. Bennett, C. Lin, R. Parsons, J. Han, Evaluation of behavior of a laterally loaded bridge pile group under scour conditions, in: *Structures Congress 2009: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*, 2009, pp. 290-299.
- [15] T. Yilmaz, S. Banerjee, P.A. Johnson, Performance of two real-life California bridges under regional natural hazards, *Journal of Bridge Engineering*, 21(3) (2016) 1-15.
- [16] X. Wang, A. Ye, B. Ji, Fragility-based sensitivity analysis on the seismic performance of pile-groups supported bridges in liquefiable ground undergoing scour potential, *Engineering Structures*, 198 (2019) 1-15.
- [17] Ö. Avşar, B. Atak, A. Caner, In-depth investigation of seismic vulnerability of an aging river bridge exposed to scour, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(5) (2017) 1-13.
- [18] H. He, K. Wei, J. Zhang, S. Qin, Application of endurance time method to seismic fragility evaluation of

- Confined with Carbon Fiber-Reinforced Polymers under Cyclic Flexure and Constant Axial Load, *Journal of Composites for Construction*, 20(3) (2016) 1-14.
- [37] V.T. CHOW, *Open Channel Hydraulics* McGraw-Hill, 1959.
- [38] C. Unanwa, M. Mahan, Statistical analysis of concrete compressive strengths for California highway bridges, *Journal of performance of constructed facilities*, 28(1) (2014) 157-167.
- [39] B. Ellingwood, H. Hwang, Probabilistic Descriptions of Resistance of Safety-Related Structures in Nuclear plant, *Nuclear Engineering and Design*, 88 (1985) 169-178.
- [40] K.-K. Phoon, F.H. Kulhawy, Characterization of geotechnical variability, *Canadian Geotechnical Journal*, 36 (1999) 612-624.
- [41] M. Cesare, First-order analysis of open-channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(2) (1991) 242-247.
- [42] P.A. Johnson, Uncertainty of hydraulic parameters, *Journal of hydraulic engineering*, 122(2) (1996) 112-114.
- Relationships in Cohesionless Soils, *Proceedings, Symposium on Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE, San Francisco, (1984) 174-191.
- [30] Japan Road Association, *Specifications for highway bridges*, in, Tokyo: Maruzen, 2005.
- [31] Architectural Institute of Japan, *Recommendations for design of building foundations*, in, Tokyo: Maruzen, 2001.
- [32] R. Manning, *On the flow of water in open channels and pipes: Institute of Civil Engineers of Ireland Transactions*, v. 20, (1891) 161-207.
- [33] AASHTO, *Standard specifications for highway bridges*, Seventh Ed, in, Washington, 2014.
- [34] Y. Chai, T.C. Hutchinson, Flexural strength and ductility of extended pile-shafts. II: Experimental study, *Journal of structural engineering*, 128(5) (2002) 595-602.
- [35] B.G. Look, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*, Taylor & Francis/Balkema, 2007.
- [36] P. Paultre, M. Boucher-Trudeau, R. Eid, N. Roy, *Behavior of Circular Reinforced-Concrete Columns*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*F. Shahaboddin, M. Dehestani, H. Yousefpour, Quantitative study of the factors affecting the behavior of reinforced concrete bridge piers against floods, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3333-3352.*

DOI: 10.22060/mej.2019.15465.6128

