

بررسی تأثیر ابعاد پدستال بتنی بر کاهش آسیب‌پذیری پی‌های مجاور مستقر بر ماسه اشباع بابلسر با مدل‌سازی فیزیکی

سیاوش سلامت پور، دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد
یاسر جعفریان*، دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و
مهندسی زلزله، تهران

البرز حاجیان نیا، استادیار، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

Email: yjafarianm@iiees.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

چکیده

دو پی در کنار هم، اغلب دارای رفتاری متفاوت از پی تک هستند. امروزه، با توجه به کمبود زمین و افزایش جمعیت، مخصوصاً در نوار ساحلی دریای خزر، احداث ساختمان‌ها در مجاورت هم، بدون در نظر گرفتن اثر متقابل پی‌ها، در حال افزایش است. این موضوع، زمانی دارای حساسیت بیشتری است که دو ساختمان هم‌جوار به‌صورت غیرهمزمان و با دو سربار متفاوت، بارگذاری شوند. به‌عبارت دیگر، ابتدا پی سبک یا قدیمی ساخته، و سپس پی سنگین در مجاورت پی سبک احداث می‌گردد. این موضوع، در مورد بنادر، که کانتینرها با شرایط نابرابر در کنار هم دپو می‌گردند، نیز صادق است. در این مطالعه، با استفاده از آزمایش مدل‌سازی کوچک مقیاس ۱g، به بررسی تأثیرات ابعاد پدستال‌های بتنی غیرمسلح بر بهسازی خاک ماسه‌ای سست اشباع، هنگامی که پدستال‌ها در خاک زیر پی سنگین یا جدید قرار می‌گیرند، بر پارامترهایی نظیر ظرفیت باربری پی سنگین، نشست و چرخش پی سبک، ناشی از هم‌جواری پی سنگین، پرداخته خواهد شد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که در یک قطر ثابت پدستال (D=5 cm)، با افزایش عمق (L) پدستال‌ها از ۱۵ به ۲۵ سانتی‌متر، به‌عنوان عامل بهسازی کننده خاک زیر پی جدید، میزان نشست و چرخش پی قدیمی ناشی از هم‌جواری پی سنگین در نرخ S/B=0 به‌ترتیب ۱۸ و ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بهسازی ماسه، پدستال بتنی، ظرفیت باربری، نشست، مدل‌سازی فیزیکی

۱. مقدمه

به‌صورت نابرابر و در شرایط غیرهمزمان اعمال گردند، شرایط هم‌جواری می‌تواند برای پی سبک یا قدیمی بسیار بحرانی گردد. این مسئله، به‌ویژه در محل دپوی کانتینرها در بنادر با ارتفاع‌های مختلف، در طراحی تأثیرگذار خواهد بود. اکثر مطالعات انجام شده توسط محققین بر اساس

تاکنون در خصوص پی‌های هم‌جوار و اثرهای مخرب احتمالی که یک پی بر پی هم‌جوار یا مرزی می‌تواند اعمال نماید به‌صورت آزمایشگاهی بررسی‌های کمی صورت گرفته است. اگر سربار اعمالی بر دو پی هم‌جوار

انتقالی به خاک را کاهش می‌دهد. آن‌ها پیشنهاد دادند که نرخ عمق بهینه قرارگیری ژئوگرید به پهنای ژئوگرید برابر $0/3$ برای دولایه ژئوگرید می‌باشد. ضمناً، گسیختگی برشی تا عمقی در حدود $0/8$ برابر عرض پی نفوذ می‌کند. جعفریان و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی، به بررسی ظرفیت باربری، نشست و فشار تراوش برای پی‌های سطحی واقع بر ماسه، با قابلیت روانگرا شدن، پرداختند. آن‌ها با به‌کارگیری یک جعبه با ابعاد $120 \times 90 \times 90$ سانتی‌متر، برای دو پی نواری و مربعی، دو گروه آزمایش انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که در شرایط مختلف، نشست رو به بالا و در یک ضریب اطمینان ثابت، مقدار نشست پی نواری بیشتر از پی مربعی می‌باشد.

در مطالعه حاضر، ۹ آزمایش مدل‌سازی کوچک‌مقیاس $1g$ بر دو پی هم‌جوار در فواصل مختلف نسبت به هم، روی ماسه سست اشباع مسلح شده با پدستال، انجام شده است. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی اثر ابعاد مختلف پدستال‌های بتنی (ستونک‌های بتنی غیرمسلح) به‌عنوان عامل بهسازی کننده خاک زیر پی جدید، بر تداخل دو پی هم‌جوار، در پارامترهایی نظیر ظرفیت باربری پی جدید و نشست و کج‌شدگی پی قدیمی می‌باشد.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱. مشخصات مصالح مورد استفاده

شهر بابلسر در بخش جنوبی دریای خزر واقع شده است. خاک این منطقه از نهشته‌های رسوبی سست (ماسه تمیز بد دانه‌بندی شده) تشکیل شده است. برای اطلاعات بیشتر از رفتار این نوع ماسه به تحقیقات جعفریان و همکاران (۲۰۱۳) و سلامت پور و سلامت پور (۲۰۱۴) مراجعه شود. مشخصات پایه‌ای ماسه بابلسر در جدول ۱ نشان داده شده است.

بررسی ظرفیت باربری نهایی پی‌های هم‌جوار در شرایط خاک بهسازی شده و نشده، و آن هم تحت بارگذاری مساوی و هم‌زمان، صورت پذیرفته است (استوارت، ۱۹۶۲؛ سلوادورای و رابا، ۱۹۸۳؛ هینگ و همکاران، ۱۹۹۲؛ کومار و ساران، ۲۰۰۳؛ کومار و گاش، ۲۰۰۷؛ کومار و کوزر، ۲۰۰۸؛ قضاوی و علیمردانی لواسان، ۲۰۰۸؛ کومار و بویی، ۲۰۰۹؛ گاش و کومار، ۲۰۰۹؛ میروکی و همکاران، ۲۰۱۰؛ گاش و کومار، ۲۰۱۱؛ ناینگالی و همکاران، ۲۰۱۳؛ سرینیواسان و گاش، ۲۰۱۳؛ التهامی و زیدان، ۲۰۱۳؛ نادری و هاتف، ۲۰۱۴؛ نورزاد و معنوی راد، ۲۰۱۴). استوارت (۱۹۶۲) برای اولین بار، به بررسی تأثیر ظرفیت باربری پی‌های نزدیک به هم، در فواصل مختلف، در خاک ماسه‌ای خشک متراکم، با استفاده از روش تعادل حدی پرداخت. نتایج این تحقیق حاکی از افزایش نشست و ظرفیت باربری با نزدیک شدن دو پی نسبت به هم است. کومار و ساران (۲۰۰۳) با انجام ۷۴ آزمایش مدل‌سازی کوچک‌مقیاس روی پی‌های نواری و مربعی نزدیک به هم، مستقر بر ماسه خشک، به بررسی تأثیر فاصله بین دو پی مستقر بر ژئوگرید پیوسته و ناپیوسته بر ظرفیت باربری و کج‌شدگی پی‌های مجاور پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که ظرفیت باربری پی‌های مجاور واقع شده روی حالت خاک بهسازی شده افزایش یافته و این افزایش ظرفیت باربری برای پی‌های نواری بیشتر از پی‌های مربعی می‌باشد.

علیمردانی لواسان و قضاوی (۲۰۱۲) به بررسی عددی نرخ ظرفیت باربری برای پی‌های مربعی نزدیک به هم، مستقر بر خاک ماسه‌ای بهسازی شده با ژئوگرید پرداختند. نتایج تحلیل عددی نشان داد که ظرفیت باربری پی‌ها تحت تأثیر پهنای لایه‌های بهسازی شده، عمق اولین لایه بهسازی شده، فاصله قائم بین لایه‌های ژئوگرید و تعداد لایه‌های بهسازی کننده می‌باشد. همچنین، بهسازی کردن خاک زیر دو پی مربعی مجاور هم به‌وسیله ژئوگرید، ظرفیت باربری را افزایش و کرنش برشی

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه بابلسر

G_s	$(\gamma_d)_{max}$	$(\gamma_d)_{min}$	D ₅₀	C _U	C _C
۲/۷۸	۱۷	۱۵/۱	۰/۲۴	۱/۸	۰/۸۸

۲-۲. آزمایش مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس

۱g

برای بررسی رفتار دقیق یک مدل خاص، لازم است که مدل در ابعاد واقعی ساخته شود. با توجه به پرهزینه بودن ساخت چنین مدل‌هایی، می‌توان آن‌ها را در ابعاد کوچک‌تر ساخته و رفتار واقعی را با توجه به موضوع مورد مطالعه با استفاده از تحلیل‌های ابعادی پیش‌بینی کرد. در این مطالعه، دو سری آزمایش مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس ۱g جهت ارزیابی رفتار تداخل پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های بهسازی شده و نشده صورت پذیرفته است. برای نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌ها، از یک جعبه با ابعاد ۹۴ سانتی‌متر طول، ۹۴ سانتی‌متر ارتفاع و ۴۰ سانتی‌متر عرض ساخته شده است. این جعبه شامل چهار ورق شفاف پلکسی‌گلاس با ضخامت ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. مزیت استفاده از ورق‌های شفاف پلکسی‌گلاس نشان دادن خاک و مدل داخل آن و امکان مشاهده تغییرشکل‌ها با ایجاد خطوط رنگی می‌باشد. روی بدنه جعبه، پنج خروجی ریز برای اتصال پی‌زوم‌تراها و اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای تعبیه شده که این خروجی‌ها به فواصل مساوی ۱۵ سانتی‌متری از کف جعبه قرار گرفته‌اند. پی‌های مورد استفاده دارای ابعاد ۴۰ سانتی‌متر طول، ۱۵ سانتی‌متر عرض و ۱۵ سانتی‌متر ارتفاع و از قوطی‌های فلزی و کاملاً صلب تشکیل شده و تحت بارگذاری، تغییرشکل ساختاری ندارند. برای اطلاعات بیشتر از نحوه نمونه‌سازی می‌توان به تحقیق سلامت پور و همکاران (۲۰۱۸ b) مراجعه نمود.

در تئوری آنالیز ابعادی ژئوتکنیک وود (۲۰۰۴)، از مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس برای به دست آوردن ویژگی‌ها و مشخصه‌های لازم در مدل واقعی استفاده

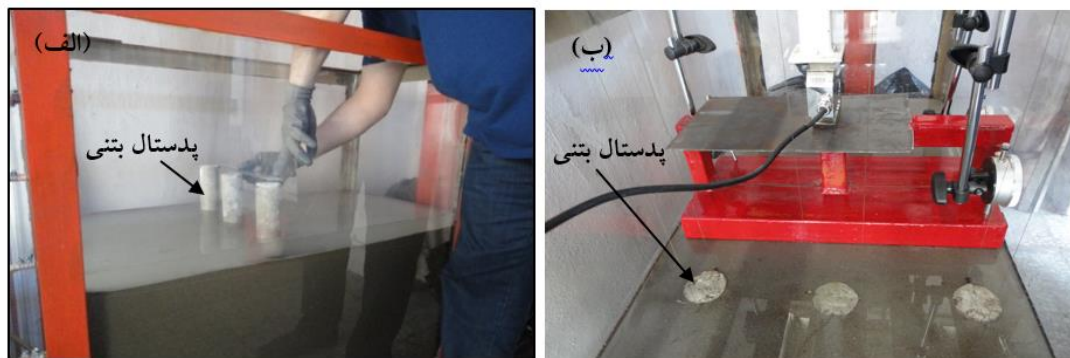
می‌شود. اغلب مدل‌های فیزیکی خیلی کوچک‌تر از مدل واقعی ساخته می‌شوند. به دلیل اینکه بتوان به اطلاعات لازم در زمان کوتاه‌تر و با کنترلی بیشتر روی جزئیات مدل دست‌یافت که این شرایط در مدل واقعی گاه یا امکان‌پذیر نخواهد بود و یا هزینه زیادی را به‌همراه خواهد داشت. در این تحقیق نیز از پارامترهای تبدیل نمونه واقعی به نمونه مدل آزمایشگاهی مطابق جدول ۲، با به‌کارگیری تئوری آنالیز ابعادی ژئوتکنیک وود (۲۰۰۴) استفاده شده است (مدل‌های کوچک‌مقیاس با نسبت ۱/۱۰ نسبت به شرایط واقعی ساخته شده‌اند (N=10)). همچنین طول پی هم‌عرض تانک در نظر گرفته شده تا اجازه ایجاد گوه گسیختگی در این وجه را ندهد. در نتیجه گوه گسیختگی فقط در یک راستا ایجاد می‌شود. به همین دلیل پی سطحی مورد استفاده رفتاری مانند پی نواری خواهد داشت (کنش صفحه‌ای). لازم به ذکر است مقیاس مذکور و همچنین جدول ۲ در خصوص پدستال‌ها نیز صادق می‌باشد.

روش نصب پدستال‌ها در خاک زیر پی جدید بدین گونه است که ابتدا جعبه آزمایش را تا ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر از آب پر کرده و ماسه که به‌صورت کاملاً خشک شده است را از روی سطح آب (از فاصله ۲/۵ سانتی‌متری از سطح آب) به‌صورت بارشی در داخل جعبه آزمایش ریخته و اجازه رسوب‌گذاری به ماسه داده می‌شود. علت این فرایند آن است که ماسه پس از رسوب‌گذاری کمترین دانسیته نسبی ممکن را داشته باشد. پس از اینکه ارتفاع نمونه به ارتفاع مشخص برای هر سری از پدستال‌ها رسید، سپس سه عدد پدستال هم‌اندازه که توسط نخ‌هایی مهار شده، در محل مورد نظر در زیر پی جدید قرار می‌گیرد. حال، ریختن ماسه ادامه می‌یابد تا سطح نهایی خاک، هم‌سطح بالای پدستال‌ها گردد. در این وضعیت، ابتدا پی قدیم با توجه به جدول آزمایش در محل مورد نظر قرار گرفته و اعمال بار می‌گردد. سپس، پی جدید روی خاک بهسازی شده توسط سه عدد پدستال (در

بررسی تأثیر ابعاد پدستال بتنی بر کاهش آسیب‌پذیری پی‌های مجاور مستقر بر ماسه اشباع بابلسر با مدل‌سازی فیزیکی

نحوه قرار دادن پدستال‌ها در نمونه‌سازی را نشان می‌دهد.

فواصل مختلف از پی قدیم) قرار می‌گیرد و گیج‌های مخصوص جهت اندازه‌گیری میزان نیروی اعمالی و نشست روی آن‌ها نصب می‌گردد. شکل ۱ (الف و ب)



شکل ۱. الف) تصاویری از روند نصب پدستال و ب) موقعیت پی قدیم در مجاورت پدستال و قبل از قرار گرفتن پی جدید در مجاورت پی قدیم

آزمایش در نظر گرفته شده شامل سری‌های اول، دوم و سوم و با سه عدد پدستال به نسبت عمق به قطر به ترتیب ۳، ۴ و ۵ ($L/D=3,4,5$) می‌باشند. هدف از نظر گرفتن ابعاد مختلف از پدستال‌ها برای بهسازی خاک زیر پی جدید، ارزیابی تأثیر عمق شمع بر میزان بهسازی خاک زیر پی جدید می‌باشد. جدول ۳، انجام آزمایش‌های این تحقیق را نشان می‌دهد.

۲-۲-۱. روش انجام آزمایش

در این مطالعه، از ۹ آزمایش در قالب سه سری آزمایش برای ارزیابی تأثیر ابعاد پدستال بر بهسازی خاک زیر پی جدید و در نتیجه کاهش تداخل دو پی نواری هم‌جوار در پارامترهایی نظیر ظرفیت باربری پی جدید، نشست و کج‌شدگی پی قدیمی استفاده گردیده است. سه سری

جدول ۳. مشخصات انجام آزمایش‌ها

شماره	سری آزمایش	ضریب اطمینان پی قدیمی	نسبت ابعادی پدستال (L/D)	فاصله دو پی (S)
۱	۱	۲	۳	۰
۲	۱	۲	۳	۰/۳B
۳	۱	۲	۳	۱B
۴	۲	۲	۴	۰
۵	۲	۲	۴	۰/۳B
۶	۲	۲	۴	۱B
۷	۳	۲	۵	۰
۸	۳	۲	۵	۰/۳B
۹	۳	۲	۵	۱B

در هنگام هم‌جواری با پی قدیم تأثیر کمتری بر آن بگذارد. با بهسازی خاک زیر پی جدید با سه سری ابعاد مختلف از پدستال‌ها، پارامترهایی نظیر ظرفیت باربری نهایی پی جدید، میزان نشست پی قدیمی و کج‌شدگی (چرخش) پی قدیم، ناشی از هم‌جواری پی جدید در شرایط مختلف بهسازی، مقایسه می‌گردند.

۳. تحلیل نتایج

به‌منظور ارزیابی بهتر تأثیر ابعاد پدستال‌ها بر ظرفیت باربری و نشست، پارامترهای بی‌بعد $(IF_B)'_{new}$ و $(IF_S)'_{old}$ به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$(IF_B)'_{new} = \frac{(q_{u-int-p})_{new}}{q_{u(single)}} \quad (1)$$

$$(IF_S)'_{old} = \frac{(\Delta_{int-p})_{old}}{A_{(single)}} \quad (2)$$

که $(q_{u-int-p})_{new}$ ظرفیت باربری نهایی پی جدید با وجود پی قدیمی در شرایط بهسازی شده با پدستال‌ها، $(\Delta_{int-p})_{old}$ نشست پی قدیمی ناشی از هم‌جواری پی جدید در فواصل مختلف در شرایط بهسازی شده با پدستال‌ها و $q_{u(single)}$ و $A_{(single)}$ نیز به ترتیب ظرفیت باربری نهایی و نشست پی تک (پی قدیمی) می‌باشند.

لازم به ذکر است که در کلیه شکل‌های این مطالعه، نمودارهای مربوط به تحقیق سلامت پور و همکاران (a) (۲۰۱۸) در رابطه با هم‌جواری دو پی جدید و قدیم در شرایط بهسازی نشده می‌باشند که برای مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده در حالت‌های مختلف بهسازی شده‌ی این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳-۱. ظرفیت باربری نهایی ناشی از تداخل پی‌ها

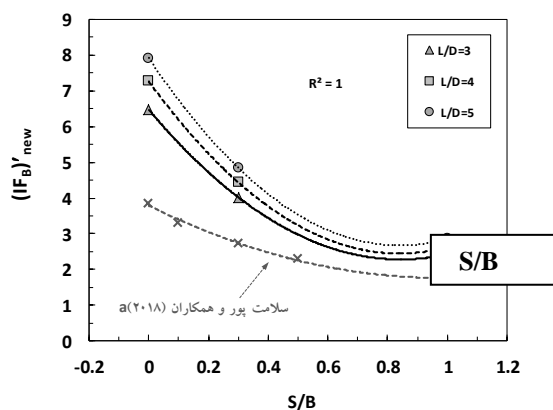
شکل ۲، نمودار تنش-نشست برای سه آزمایش بهسازی شده در نرخ $S/B=0$ (دو پی به هم چسبیده) به همراه یک آزمایش مربوط به پی تک می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، کلیه آزمایش‌ها در سمت راست منحنی تنش-نشست پی تک قرار می‌گیرند که این موضوع

در تمامی آزمایش‌ها، ابتدا یک پی نواری 15×40 سانتی‌متر روی سطح ماسه اشباع شده‌ای که از قبل نمونه ماسه‌ای آن در جعبه آماده شده است قرار می‌گیرد. سپس، بار روی پی تک اعمال می‌گردد و ظرفیت باربری متناظر با نشست معادل ۲۰٪ بُعد پی (به‌عنوان معیار گسیختگی) به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که بر پایه نظریه داس (۲۰۰۹)، ظرفیت باربری نهایی معادل باری است که ایجاد نشست معادل ۱۵ تا ۲۵ درصد بُعد پی را ایجاد کند (در حالت گسیختگی موضعی یا سوراخ‌کننده). در این مطالعه، نرخ نشست متناظر با ظرفیت باربری نهایی حدود ۲۰٪ بُعد پی در نظر گرفته شده است.

سپس، پی قدیمی که مبین پی سبک می‌باشد تا باری مشخص (با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مربوطه $FS=2$) بارگذاری می‌گردد. سپس، پی دوم در فاصله‌ای مشخص از پی اول قرار داده می‌شود. در این وضعیت، پی دوم مبین پی جدید یا سنگین خواهد بود. در این زمان، با ثابت نگه‌داشتن بار روی پی قدیمی، پی جدید تا رسیدن به ظرفیت باربری نهایی (لحظه گسیختگی) بارگذاری می‌گردد. در نهایت، ظرفیت باربری پی جدید، نشست و کج‌شدگی پی قدیم ناشی از تداخل پی جدید ثبت گردیده و با مقادیر به‌دست‌آمده از پی تک مقایسه می‌گردد (سلامت پور و همکاران، ۲۰۱۸ a).

در این مرحله، که بحث اصلی این تحقیق است، سه سری پدستال (هر سری دارای سه عدد پدستال مشابه) هم‌اندازه در خاک زیر پی جدید به قطر ۵ سانتی‌متر و با فاصله مرکز به مرکز پدستال برابر $2/5$ برابر قطر پدستال، به ترتیب در عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر از سطح بالای نمونه، به‌عنوان عامل بهسازی کننده خاک زیر پی جدید قرار داده می‌شود. وجود پدستال‌ها در زیر پی جدید موجب می‌گردد تا حباب‌های تنش القایی اضافی پی جدید به اعماق پایین‌تر خاک هدایت شده و پی جدید

تک تعریف می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، هنگامی که سه عدد پدستال در زیر پی جدید با عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر قرار می‌گیرند، مقدار $(IF_B)'_{new}$ در نرخ $S/B=0$ به ترتیب برابر $۶/۴۷$ ، $۷/۲۷$ و $۷/۹۲$ می‌گردد. به عبارت دیگر، در شرایط ذکر شده، ظرفیت باربری پی جدید به علت قرار دادن سه عدد پدستال در زیرخاک پی جدید و ناشی از مجاورت پی قدیم به ترتیب $۶/۴۷$ ، $۷/۲۷$ و $۷/۹۲$ برابر ظرفیت باربری پی تک گردیده است.

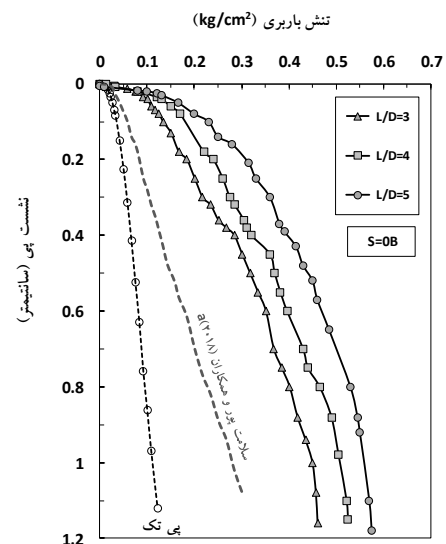


شکل ۳. ضریب تأثیر تداخل ظرفیت باربری پی جدید ناشی از هم‌جواری در نرخ‌های مختلف S/B در حالت بهسازی شده با عمق‌های مختلف پدستال

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، در نمودار تحقیق سلامت پور و همکاران (۲۰۱۸ a) که مربوط به هم‌جواری دو پی در حالت بهسازی نشده می‌باشد، پارامتر $(IF_B)'_{new}$ در نرخ $S/B=0$ برابر $۳/۸۵$ بوده است. افزایش چشمگیر ظرفیت باربری پی جدید ناشی از هم‌جواری پی قدیم در حالت‌های بهسازی شده، نسبت به حالت بهسازی نشده، ناشی از وجود پدستال‌ها در خاک زیر پی جدید می‌باشد.

مقدار پارامتر بی‌بعد $(IF_B)'_{new}$ با افزایش فاصله دو پی از یکدیگر کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که هنگامی که

نشان‌دهنده‌ی آن است که هنگامی که پدستال‌ها با قطر ثابت ۵ سانتی‌متر ($D=5$ cm) و با عمق‌های مختلف ($L=15, 20, 25$ cm) در خاک زیر پی جدید، در مجاورت پی قدیمی، به‌عنوان عامل بهسازی‌کننده خاک قرار می‌گیرند، بر ظرفیت باربری پی جدید افزوده می‌گردد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در نرخ $S/B=0$ (دو پی به هم چسبیده)، با قرار دادن سه عدد پدستال در خاک زیر پی جدید، میزان ظرفیت باربری پی جدید به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. هر چه عمق پدستال‌ها بیشتر می‌گردد، میزان ظرفیت باربری پی جدید نیز افزایش بیشتری می‌یابد. به گونه‌ای که برای سه عدد پدستال به عمق ۲۵ سانتی‌متر، پی جدید بیشترین ظرفیت باربری را ناشی از مجاورت پی قدیم نسبت به حالت‌های دیگر تجربه می‌کند.



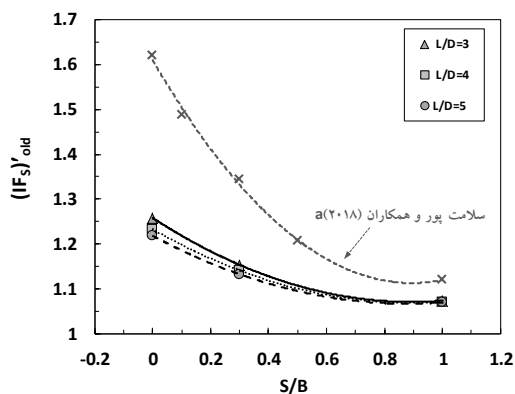
شکل ۲. نمودارهای تنش به نشست برای سه آزمایش در شرایط خاک بهسازی شده با ابعاد مختلف پدستال در نرخ $S/B=0$

مقدار $(IF_B)'_{new}$ پارامتری بی‌بعد برای تعیین میزان تأثیر تداخل بر ظرفیت باربری پی جدید می‌باشد و به‌صورت نسبت ظرفیت باربری پی جدید در حالت بهسازی شده (با سه عدد پدستال) به ظرفیت باربری پی

می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، نشست تفاضلی پی قدیم ناشی از مجاورت پی جدید در هر دو سری از آزمایش‌ها و برای هر دو حالت بهسازی شده و بهسازی نشده، با افزایش نرخ S/B کاهش چشمگیری می‌یابد. نشست پی قدیم ناشی از قرارگیری پی جدید در نزدیکی آن موجب افزایش نشست در پی قدیم در تمامی نرخ‌های S/B می‌گردد. با توجه به نرخ مجاز نشست پی در ماسه به میزان ۵۱ میلی‌متر (اسمکتون و مک‌دونالد، سال ۱۹۵۶). همچنین تبدیل میزان نشست واقعی به نشست در مدل در آزمایش کوچک مقیاس ۱g، بر طبق نظریه پیشنهادی وود (۲۰۰۴)، مقدار $N^{2-\alpha}$ می‌باشد که برای ماسه $\alpha=0/5$ ذکر گردیده است. بنابراین، نشست مجاز برای پی نواری در مدل حداکثر به میزان ۱/۶۱ میلی‌متر خواهد شد.

بر اساس مطالعه سلامت پور و همکاران (۲۰۱۸ a)، نشست تفاضلی پی قدیم در شرایط بهسازی نشده و برای آزمایش‌های (St-1-2-0B)، (St-1-2-0.1B) و (St-1-2-2) (0.3B) که شامل سه آزمایش می‌باشند (برای $FS=2$) در شرایطی که دو پی در مجاورت هم قرار دارند (در وضعیت بهسازی نشده) از حد مجاز نشست تجاوز نموده‌اند که شرایط وخیمی را برای پی قدیمی ایجاد خواهند نمود.



شکل ۴. ضریب تأثیر تداخل نشست در نرخ‌های مختلف S/B در حالت بهسازی شده با عمق‌های مختلف پدستال

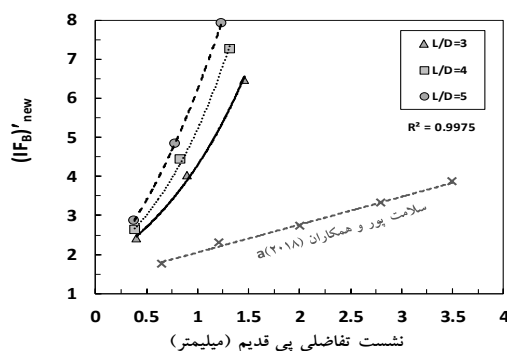
فاصله دو پی نسبت به هم برابر بُعد پی می‌گردد، ظرفیت باربری پی جدید ناشی از هم‌جواری پی قدیم در شرایط بهسازی شده برای عمق‌های پدستال ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر به ترتیب ۲/۴۲، ۲/۶۲ و ۲/۸۶ برابر ظرفیت باربری پی قدیمی یا تک می‌گردد. به عبارت دیگر، با اینکه دو پی به اندازه عرض پی با هم فاصله دارند، ولی باز هم ظرفیت باربری پی جدید به علت بهسازی انجام شده، با توجه به عمق پدستال‌ها، حدود ۲ تا ۳ برابر ظرفیت باربری پی تک افزایش یافته است. هنگامی که عمق سه عدد پدستال زیر پی جدید از ۱۵ به ۲۵ سانتی‌متر تغییر می‌یابد، میزان ظرفیت باربری پی جدید در نرخ $S/B=0$ به میزان ۲۲٪ افزایش می‌یابد. همچنین، میزان ظرفیت باربری پی جدید برای هر سه عمق ذکر شده برای پدستال‌ها در نرخ $S/B=0$ نسبت به نرخ $S/B=1$ بیش از ۲/۵ برابر گردیده است.

۳-۲. تأثیر تداخل بر نشست

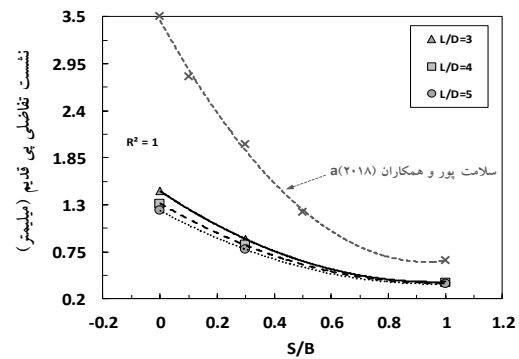
پارامتر بی‌بعد $(IFs)'_{old}$ به صورت نشست کل پی قدیم ناشی از تداخل پی جدید تقسیم بر نشست پی تک تعریف می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، با قرار دادن سه سری پدستال با عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر در زیر پی جدید هم‌جوار در نرخ $S/B=0$ مقدار پارامتر $(IFs)'_{old}$ از ۱/۶۲ برای حالت بهسازی نشده به ترتیب به ۱/۲۶، ۱/۲۳ و ۱/۲۱ می‌رسد. به عبارت دیگر، با بهسازی خاک زیر پی جدید با سه سری پدستال با عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، میزان نشست پی قدیم ناشی از هم‌جواری پی جدید در نرخ $S/B=0$ نسبت به حالت بهسازی نشده به ترتیب ۲۹، ۳۲ و ۳۴ درصد کاهش می‌یابد. این مقادیر کاهش نشست برای پی‌های قدیمی ناشی از مجاورت پی جدید می‌تواند بسیار حائز اهمیت و در جهت اطمینان باشد. تغییر مقدار پارامتر $(IFs)'_{old}$ برای عمق‌های مختلف پدستال در نرخ $S/B=0$ برای عمق ۲۵ سانتی‌متر نسبت به عمق ۱۵ سانتی‌متر ۴٪

نکته حائز اهمیت این است که هنگامی که پدستال به‌عنوان عامل بهسازی کننده و عاملی برای انتقال حباب‌های تنش القایی اضافی به اعماق پایین‌تر نصب می‌گردد تأثیرات پی جدید بهسازی شده بر نشست پی قدیم بسیار کاهش می‌یابد. به‌گونه‌ای که تمامی نشست‌های تفاضلی پی قدیم ناشی از اعمال بار بر پی جدید در حالت بهسازی نشده با وجود ۳ عدد پدستال با عمق‌های مختلف در خاک زیر پی جدید از نشست‌های مجاز کمتر می‌گردد و دیگر خطری از لحاظ مقدار نشست نامتقارن غیرمجاز، پی قدیمی را تهدید نخواهد کرد.

همان‌طور که در شکل ۶ به‌وضوح مشاهده می‌گردد، تغییر شرایط دو پی هم‌جوار بهسازی نشده به حالت بهسازی شده، با قرار دادن پدستال‌ها در زیر پی جدید، موجب افزایش چشمگیر ظرفیت باربری پی جدید و به‌تبع آن افزایش پارامتر $(IF_B)_{new}$ ناشی از هم‌جواری پی قدیمی در شرایط بهسازی شده می‌گردد. این افزایش ظرفیت باربری پی جدید باعث کاهش شدید نشست تفاضلی پی قدیمی ناشی از مجاورت پی جدید در هر سه سری از عمق‌های پدستال استفاده شده به‌عنوان عامل بهسازی کننده می‌گردد. همچنین، در یک نرخ S/B ثابت، با افزایش عمق پدستال‌ها، نشست پی قدیمی ناشی از مجاورت پی جدید کاهش بیشتری می‌یابد.



شکل ۶. ضریب تأثیر تداخل ظرفیت باربری پی جدید ناشی از هم‌جواری در مقابل نشست تفاضلی پی قدیم در حالت بهسازی شده با عمق‌های مختلف پدستال



شکل ۵. نشست تفاضلی پی قدیم ناشی از تداخل پی جدید در نرخ‌های مختلف S/B در حالت بهسازی شده با عمق‌های مختلف پدستال

حال، در این مطالعه، همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، با بهسازی زیر پی جدید با استفاده از سه عدد پدستال، میزان تأثیر پی جدید بر نشست تفاضلی پی قدیم به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، با بهسازی خاک زیر پی جدید با سه سری پدستال به قطر ثابت ۵ سانتی‌متر و با عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، یعنی $L/D=3, 4, 5$ در نرخ $S/B=0$ میزان نشست تفاضلی پی قدیم ناشی از مجاورت پی جدید نسبت به حالت بهسازی نشده به ترتیب ۲۴۰، ۲۶۶ و ۲۸۵ درصد کاهش یافته است. این مقادیر کاهش برای نرخ $S/B=1$ به ترتیب ۱۶۲، ۱۶۷ و ۱۷۲ درصد می‌باشد. نتایج چشمگیر در کاهش نشست پی قدیمی ناشی از مجاورت پی جدید در حالت بهسازی شده نسبت به حالت بهسازی نشده، ناشی از کاهش تأثیر پدیده تداخل ناشی از بهسازی خاک زیر پی جدید می‌باشد که باعث تأثیر کمتر بر نشست پی قدیمی گردیده است. با مقایسه نشست تفاضلی پی قدیمی ناشی از مجاورت پی جدید در حالت بهسازی شده با عمق‌های مختلف، دیده می‌شود که در نرخ $S/B=0$ استفاده از سه عدد پدستال با عمق ۲۵ سانتی‌متر، نسبت به سه عدد پدستال با عمق ۱۵ سانتی‌متر، موجب کاهش ۱۸/۵ درصدی در نشست پی قدیم گردیده است. این مقدار کاهش برای نرخ $S/B=1$ برابر ۵/۷ درصد می‌باشد.

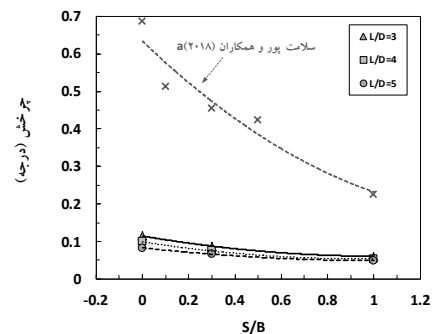
۳-۳. تأثیر تداخل بر کج شدگی پی ها

با قرار دادن سه سری از پدستال‌ها (سه عدد) در خاک زیر پی جدید به‌عنوان عامل بهسازی کننده خاک ماسه‌ای و عاملی به جهت انتقال حباب‌های تنش القایی از سوی پی سنگین به اعماق پایین تر خاک، دیده می‌شود که تأثیر پی جدید بهسازی شده به‌طور چشمگیری بر کج شدگی پی قدیم کاهش می‌یابد. در این حالت (وضعیتی که در خاک زیر پی جدید پدستال وجود دارد) در نرخ $S/B=0$ با استفاده از سه سری پدستال با عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، میزان کج شدگی به ترتیب به مقادیر ۰/۱۱، ۰/۰۹۹ و ۰/۰۸۳ درجه می‌رسد. به عبارت دیگر، در نرخ $S/B=0$ و با استفاده از پدستال‌ها، میزان کج شدگی (چرخش) پی قدیم ناشی از مجاورت پی جدید در حالت بهسازی شده برای سه عمق ذکر شده، نسبت به حالت بهسازی نشده، به ترتیب ۶، ۶/۹ و ۸/۲۵ برابر کاهش یافته است. در نرخ $S/B=1$ (در کمترین حالت کج شدگی پی قدیم) میزان چرخش پی قدیم ناشی از مجاورت پی جدید در حالت بهسازی شده با استفاده از سه عمق مختلف پدستال‌ها به ترتیب ۳/۷۳، ۴/۱ و ۴/۵۷ برابر کاهش را نسبت به حالت بهسازی نشده نشان می‌دهد. در نرخ $S/B=0$ در شرایطی که برای بهسازی از سه عدد پدستال با عمق ۲۵ سانتی‌متر استفاده می‌گردد، نسبت به حالتی که از سه عدد پدستال با عمق ۱۵ سانتی‌متر استفاده می‌شود، میزان چرخش (کج شدگی) پی قدیمی ناشی از مجاورت پی جدید ۳۸٪ کاهش می‌یابد. این میزان کاهش برای نرخ $S/B=1$ به کمترین مقدار خود، یعنی ۲۲/۵ درصد، می‌رسد.

مهم‌ترین نکته این است که با قرار دادن سه سری پدستال بتنی غیرمسلح با $L/D=3,4,5$ (قطر ۵ سانتی‌متر و عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) در خاک زیر پی جدید به‌عنوان بهسازی کننده خاک ماسه‌ای دیده می‌شود که در تمامی آزمایش‌های انجام شده در حالت بهسازی شده، میزان کج شدگی پی قدیمی ناشی از مجاورت پی

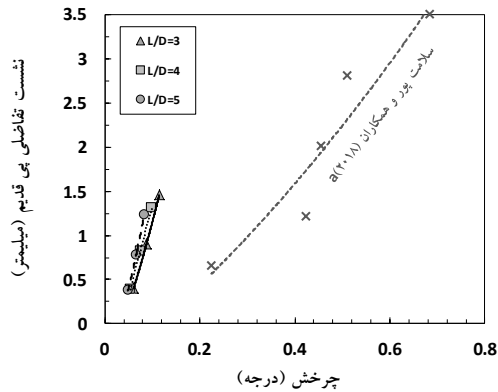
روش‌های مختلفی جهت کاهش دوران پی قدیمی ناشی از مجاورت پی جدید وجود دارد. این روش‌ها شامل استفاده از شمع‌های عمیق، تثبیت خاک و میکروپایل می‌شود. روش پیشنهادی در این مطالعه، استفاده از پدستال‌ها به‌عنوان عامل مسلح کننده خاک زیر پی جدید به‌صورت ستونک‌های بتنی غیرمسلح است که قبل از اجرای پی جدید هم‌جوار پی قدیمی و در خاک زیر پی جدید اجرا می‌گردد و به علت سهولت در اجرا و اثرهای مخرب کمتر در حین اجرا بر ساختمان قدیمی گزینه مناسب‌تری می‌باشد.

با توجه به شکل ۷ و بر اساس مطالعه انجام شده توسط سلامت پور و همکاران (۲۰۱۸ a یا ۲۰۱۸ b) دیده می‌شود که در حالتی که دو پی هم‌جوار بهسازی نشده هستند، یعنی در زیر پی جدید پدستال وجود ندارد، میزان تأثیر تداخل ناشی از بارگذاری پی جدید بر کج شدگی پی قدیمی بسیار چشمگیر می‌باشد. میزان کج شدگی در نرخ $S/B=0$ برای آزمایش‌های سری ۱، $FS=2$ در حالت بهسازی نشده ۰/۶۸ درجه می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در کلیه پنج آزمایش در حالت بهسازی نشده، کلیه چرخش‌های پی قدیم ناشی از مجاورت پی جدید از حد مجاز چرخش (۱/۳۰۰) تجاوز نموده است، که این امر می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را برای پی سبک و قدیمی از سوی پی جدید در این شرایط تحمیل نماید.



شکل ۷. چرخش (کج شدگی) پی قدیم ناشی از هم‌جواری پی جدید در نرخ‌های مختلف S/B در حالت بهسازی شده با عمق‌های مختلف پدستال

ج- هنگامی که عمق سه عدد پدستال زیر پی جدید از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۵ سانتی‌متر تغییر می‌یابد، میزان ظرفیت باربری پی جدید ناشی از مجاورت پی قدیم در نرخ $S/B=0$ به میزان ۲۲٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۸. نسبت تفاضلی پی قدیم ناشی از هم‌جواری پی جدید در مقابل چرخش (کج‌شدگی) پی قدیمی در حالت بهسازی شده با عمق‌های مختلف پدستال

د- به علت بهسازی خاک زیر پی جدید توسط سه سری پدستال با عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، میزان نشست پی قدیم ناشی از هم‌جواری پی جدید در نرخ $S/B=0$ نسبت به حالت بهسازی نشده، به ترتیب ۲۹، ۳۲ و ۳۴ درصد کاهش می‌یابد.

ه- در حالت بهسازی شده، در نرخ $S/B=0$ و با استفاده از سه سری پدستال با عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، میزان کج‌شدگی (چرخش) پی قدیم ناشی از مجاورت پی جدید، نسبت به حالت بهسازی نشده، به ترتیب ۶، ۶/۹ و ۸/۲۵ برابر کاهش یافته است.

و- در نرخ $S/B=0$ در شرایطی که برای بهسازی از سه عدد پدستال با عمق ۲۵ سانتی‌متر استفاده می‌گردد، نسبت به حالتی که از سه عدد پدستال با عمق ۱۵ سانتی‌متر استفاده می‌شود، میزان چرخش (کج‌شدگی) پی قدیمی ناشی از مجاورت پی جدید ۳۸٪ کاهش می‌یابد.

جدید در محدوده چرخش (کج‌شدگی) مجاز قرار می‌گیرند.

همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر گردید، وجود پدستال‌ها به‌عنوان بهسازی کننده خاک زیر پی جدید می‌تواند نشست و چرخش پی قدیم یا سبک، ناشی از مجاورت پی جدید یا سنگین، را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. در شکل ۸ نیز به‌وضوح مشاهده می‌گردد که وجود پدستال‌ها با عمق‌های مختلف باعث گردیده است تا میزان چرخش نسبت به حالت بهسازی نشده به‌طور چشمگیری کاهش یابد. به‌گونه‌ای که تمامی پنج آزمایش شده در شرایط بهسازی نشده با اعمال حالت بهسازی به‌طور کلی در محدوده مجاز چرخش قرار می‌گیرند. در میان سه نوع بهسازی پذیرفته شده در این تحقیق، با سه عمق مختلف پدستال، تأثیر سه عدد پدستال با عمق ۲۵ سانتی‌متر از دو عمق در نظر گرفته شده دیگر بر کاهش چرخش (کج‌شدگی) پی قدیم بیشتر بوده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با توجه به ۹ آزمایش مدل‌سازی کوچک مقیاس ۱g به‌صورت بهسازی شده، با استفاده از سه سری پدستال با قطر ثابت و با سه عمق مختلف (بهسازی خاک زیر پی جدید با سه عدد پدستال) نتایج زیر قابل استناد می‌باشد:

الف- وجود پدستال در عمق‌های مختلف به‌عنوان عامل بهسازی کننده خاک زیر پی جدید می‌تواند به‌طور چشمگیری اثر تداخل دو پی سبک و سنگین بر هم را کاهش دهد.

ب- هنگامی که سه عدد پدستال در زیر پی جدید با عمق‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر قرار می‌گیرند، مقدار ظرفیت باربری پی جدید در نرخ $S/B=0$ به ترتیب ۶/۴۷، ۷/۲۷ و ۷/۹۲ برابر ظرفیت باربری پی تک می‌گردد.

۵. مراجع

- Alimardani Lavasan, A. and Ghazavi, M. 2012. "Behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand". *Soils Found.*, 52(1): 160-167.
- Eltohamy, A. M. and Zidan, A. F. 2013. "Performance of interfering strip footings resting on reinforced sand under uniform and nonuniform load- Experimental and numerical study. *J. Am. Sci.*, 9(1): 421-430.
- Ghazavi, M. and Alimardani Lavasan, A. 2008. "Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics". *Geotext. Geomembranes*, 26: 404-415.
- Ghosh, P. and Kumar, P. 2009. "Interference effect of two nearby strip footings on reinforced sand". *Contemp. Eng. Sci.*, 2(12): 577-592.
- Ghosh, P. and Kumar, S. 2011. "Interference effect of two nearby strip surface footings on cohesionless layered soil". *Int. J. Geotech. Eng.*, 5(1): 87-94.
- Ghosh, P. and Sharma, A. 2010. "Interference effect of two nearby strip footings on layered soil: Theory of elasticity approach". *Acta Geotech.*, 5(3): 189-198.
- Jafarian, Y., Ghorbani, A., Salamatpoor, S. and Salamatpoor, S. 2013. "Monotonic triaxial experiments to evaluate steady-state and liquefaction susceptibility of Babolsar sand". *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, 14(10): 739-750.
- Jafarian, Y., Haddad, A. and Mehrzad, B. 2016. "Load-settlement mechanism of shallow foundations rested on saturated sand with upward seepage". *Int. J. Geomech.*, 17(3): 1-14.
- Khing, K. H., Das, B. M., Yen, S. C., Puri, V. K. and Cook, E. E. 1992. "Interference effect of two closely-spaced strip foundations on geogrid-reinforced sand". *Geotech. Geol. Eng.*, 10: 257-271.
- Kouzer, K. M. and Kumar, J. 2010. "Ultimate bearing capacity of a footing considering the interference of an existing footing on sand". *Geotech. Geol. Eng.*, 28: 457-470.
- Kumar, A. and Saran, S. 2003. "Closely spaced footings on geogrid-reinforced sand". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(7): 660-664.
- Kumar, J. and Bhoi, K. M. 2009. "Interference of two closely spaced strip footings on sand using model tests". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(4): 595-604.
- Kumar, J. and Ghosh, P. 2007. "Upper bound limit analysis for finding interference effect of two nearby strip footings on sand. *Geotech. Geol. Eng.*, 25(5): 499-507.
- Kumar, J. and Kouzer, K. M. 2008. "Bearing capacity of two interfering footings". *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 32: 251-264.
- Kumar, Y. R., Saran, S. and Shanker, D. 2017. "Interference between two adjacent footings located in seismic region". *Geosci.*, 7(4): 129-140.
- Lee, J. and Eun, J. 2009. "Estimation of bearing capacity for multiple footings in sand". *Comp. Geotech.*, 36: 1000-1008.
- Mabrouki, A., Benmeddour, D., Frank, R. and Mellas, M. 2010. "Numerical study of the bearing capacity for two interfering strip footings on sands". *Comp. Geotech.*, 37: 431-439.
- Naderi, E. and Hataf, N. 2014. "Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 42: 191-200.
- Nainegali, L., Basudhar, P. and Ghosh, P. 2013. "Interference of two asymmetric closely spaced strip footings resting on nonhomogeneous and linearly elastic soil bed". *Int. J. Geomech.*, 13(6): 840-851.
- Noorzad, R. Manavirad, E. 2014. "Bearing capacity of two close strip footings on soft clay with geotextile". *Arab. J. Geosci.*, 7(2): 623-639.
- Salamatpoor, S. and Salamatpoor, S. 2014. "Evaluation of Babolsar sand behaviour by using static triaxial tests and comparison with case History". *Open J. Civil Eng.*, 4(3): 181-197.
- Salamatpoor, S., Jafarian, Y. and Hajiannia, A. 2018a. "Bearing capacity and uneven settlement of consecutively-constructed adjacent footings rested on saturated sand using model tests". *Int. J. Civil Eng.*, DOI: 10.1007/s40999-018-0295-y.
- Salamatpoor, S., Jafarian, Y. and Hajiannia, A. 2018b. "Mitigating the uneven settlement of nearby strip footings on loose saturated sand using concrete pedestals: A model test study". *Sci. Iran. A*, DOI: 10.24200/sci.2018.50450.1698.
- Selvadurai, A. P. S. and Rabbaa, S. A. A. 1983. "Some experimental studies concerning the contact stresses beneath interfering rigid strip foundations resting on a granular stratum". *Can. Geotech. J.*, 20(3): 406-415.
- Srinivasan, V. and Ghosh, P. 2013. "Experimental investigation on interaction problem of two nearby circular footings on layered cohesionless soil". *Geomech. Geoen.*, 8(2): 97-106.
- Stuart, J. G. 1962. "Interference between foundations, with special reference to surface footings in sand". *Geotech.*, 12(1): 15-22.

Wood, D. M. 2004. "Geotechnical modeling". Spon Press, London.