

بررسی آزمایشگاهی تأثیر ژئوسل در رفتار پی نواری واقع بر شیروانی خاکی

حامد یزدانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
مهدی آشتیانی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

Email: m.ashtiani@nit.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱

چکیده

شیروانی‌های خاکی با توجه به شرایط هندسی، پارامترهای مصالح و بارهای وارده ممکن است نیاز به پایدارسازی داشته باشند. مسلح نمودن با ژئوسنتتیک‌ها یکی از راهکارها جهت پایدارسازی شیروانی‌های خاکی، بخصوص تحت سربار، می‌باشد. امروزه، استفاده از ژئوسل به عنوان یک مسلح‌کننده ژئوسنتتیک سه‌بعدی گسترش زیادی پیدا نموده است. در این تحقیق، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس، به بررسی نقش ژئوسل در ارزیابی رفتار پی نواری واقع بر شیروانی خاکی با زاویه شیب ۷۰ درجه پرداخته شده است. نتایج نشان داد که به منظور افزایش ظرفیت باربری پی واقع بر شیروانی خاکی با شیب زیاد، به تعداد مشخصی ژئوسل نیاز بوده و در صورت استفاده از سه لایه ژئوسل یا بیشتر، ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد. ظرفیت باربری برای سه لایه و چهار لایه ژئوسل به ترتیب ۳/۶ و ۴/۹ برابر حالت غیرمسلح است. ژئوسل، با توجه به رفتار غشایی، باعث انتقال بار به لایه‌های زیرین خاک شده و در صورت کم بودن تعداد لایه‌های مسلح‌کننده، شیروانی تحت باری تقریباً مشابه حالت غیرمسلح گسیخته می‌شود. استفاده از ژئوسل موجب افزایش سختی شیروانی خاکی شده و دوران پی واقع بر شیروانی و جابجایی افقی تاج شیروانی نسبت به حالت غیرمسلح کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از تعداد لایه کافی ژئوسل موجب می‌گردد که شیروانی قابلیت جذب انرژی بیشتری را داشته و جابجایی‌های بیشتری را قبل از گسیختگی تحمل نماید. افزایش فاصله بین ژئوسل‌ها از ۷۵ به ۱۰۰ میلی‌متر موجب کاهش کارایی مجموعه شیروانی مسلح شده است به طوری که ظرفیت باربری در حدود ۳۵ درصد نسبت به ژئوسل با فواصل کمتر، کاهش داشته است. همچنین، سختی شیروانی مسلح با افزایش فاصله بین مسلح‌کننده‌ها کاهش یافت. ظرفیت باربری پی با عمق کارگذاری ۱۰۰ میلی‌متر، ۱/۳ برابر ظرفیت باربری پی واقع بر بالای شیروانی مسلح می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شیروانی مسلح، ژئوسل، پی نواری، مدل فیزیکی، ظرفیت باربری.

۱. مقدمه

با توجه به وقوع زمین‌لغزش و ناپایداری در شیب‌های خاکی، پایداری آنها یکی از موضوعات مهم است؛ بخصوص زمانی که ساختمان‌ها، دیوارها و سایر سازه‌های مهندسی بر بخش بالایی شیروانی‌ها ساخته می‌شوند، ظرفیت باربری کاهش یافته و میزان نشست پی نیز افزایش می‌یابد (بورساکور و همکاران، ۱۹۸۸؛ جوان‌خوشدل و باترست، ۲۰۱۶). یکی از اقداماتی که جهت پایداری‌سازی شیروانی‌های خاکی می‌توان انجام داد مسلح نمودن آنها با استفاده از مصالح ژئوسنتتیک است. در این تکنیک، با قرار گرفتن مسلح‌کننده در خاک، خصوصیات مهندسی خاک بهبود می‌یابد. ژئوسل به عنوان یکی از مصالح ژئوسنتتیک به علت ماهیت سه‌بعدی و محصورکنندگی خاک، علاوه بر مقاومت برشی نسبتاً خوب بین خاک و مسلح‌کننده، نقش به‌سزایی در افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش تغییرمکان جانبی ایفا می‌کند. مطالعات قبلی نشان داده است که استفاده از ژئوسل در شیروانی‌های خاکی باعث افزایش ضریب اطمینان شیروانی در برابر گسیختگی برشی و همچنین افزایش ظرفیت باربری پی واقع بر بالای شیروانی خواهد شد (چودھاری و همکاران، ۲۰۱۰؛ دس و همکاران، ۲۰۰۷؛ فهلیانی و همکاران، ۲۰۲۱؛ کاظمیان و آروین، ۲۰۱۹؛ مهدی پور و همکاران، ۲۰۱۳).

دس و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی آزمایشگاهی رفتار پی نواری واقع بر بستر مسلح با ژئوسل پرداختند. آنها پی بردند که برای جلوگیری از تغییرشکل در دیواره‌های ژئوسل زیر پی، اولین لایه ژئوسل باید در عمق $0.1B$ (عرض پی) قرار داده شود. چودھاری و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس رفتار پی نواری روی شیروانی مسلح با ژئوگرید پرداختند. زاویه شیب مورد بررسی در این تحقیق ۴۵ و ۶۰ درجه بوده است. آنها دریافتند که افزایش پهنای پی از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی‌متر موجب کاهش ناچیز در مقدار ظرفیت باربری پی خواهد

شد. همچنین، با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید و افزایش فاصله پی از تاج شیروانی، ظرفیت باربری پی افزایش یافته است. مهدی‌پور و همکاران (۲۰۱۳) به مطالعه عددی پایداری شیروانی خاکی مسلح‌شده با ژئوسل با در نظر گرفتن ظرفیت خمشی برای ژئوسل پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که لایه ژئوسل همانند یک دال پهن عمل می‌کند. بنابراین، می‌تواند از گسیختگی صفحه‌ای در مقابل پیشروی و بازپخش نیرو در یک سطح وسیع‌تر جلوگیری نماید. همچنین، محل قرارگیری مؤثر لایه‌های ژئوسل در موقعیتی معادل میانه ارتفاع شیروانی و بخش میانی صفحه گسیختگی بحرانی شیروانی غیرمسلح می‌باشد. با کاهش زاویه اصطکاک یا افزایش چسبندگی خاک، محدوده گسیختگی بالقوه شیروانی بیشتر می‌شود. بنابراین، محل قرارگیری مسلح‌کننده کمی دورتر از میانه ارتفاع شیروانی خواهد بود. عمق محل قرارگیری مؤثر برای خاک رسی 0.4 ارتفاع شیروانی و برای خاک ماسه‌ای 0.6 ارتفاع شیروانی می‌باشد. کاظمیان و آروین (۲۰۱۹) به بررسی عددی سه‌بعدی شیروانی‌های مسلح با ژئوسل به روش کاهش مقاومت پرداختند. نتایج نشان داد که قرار دادن یک لایه ژئوسل در بخش بالایی شیروانی، عملکرد بهتری را نسبت به قرارگیری آن در بخش‌های میانی و پایینی به همراه خواهد داشت. فهلیانی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر پارامترهای تأثیرگذار در پاسخ رفتار پی نواری واقع بر شیروانی‌های غیرمسلح و مسلح‌شده با ژئوسل با استفاده از یک سری مدل آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس پرداختند. حداکثر مقدار شیب لحاظ شده برای شیروانی یک‌طرفه برابر ۳۵ درجه بوده است. نتایج نشان داد که قرار دادن یک لایه ژئوسل، حتی بدون طول ادامه یافته از سمت راست پی (سمت دورتر از تاج شیروانی) باعث بهبود قابل توجه عملکرد پی‌های واقع بر شیروانی‌ها می‌شود. در این شرایط، پی در فاصله‌ای به اندازه دو برابر عرض پی از تاج شیروانی و ژئوسل نیز

فاصله بین لایه‌ها، طول لایه ژئوسل و عمق کارگذاری پی در ظرفیت باربری پی نواری واقع بر بالای شیروانی خاکی مسلح با ژئوسل با زاویه شیب ۷۰ درجه پرداخته شده است. اگرچه پارامتر فاصله پی از شیب در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. بایستی اشاره نمود که دلیل انتخاب شیب ۷۰ درجه شیروانی، بررسی رفتار شیروانی با شیب زیاد و همچنین محدودیت فضا در جعبه آزمایش برای به حداقل رساندن اثرات مرزی دیواره‌ها بوده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

یک سری آزمایش‌های مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس در جعبه آزمایش صلب با ابعاد داخلی $1100 \text{ mm} \times 900 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$ (طول \times عرض \times ارتفاع) انجام شده است. تمام دیواره‌های جعبه از صفحات شفاف ۸ میلی‌متری پوشانده شده است تا تغییرشکل‌ها حین انجام آزمایش قابل مشاهده باشد. میله‌های فولادی توخالی مربعی‌شکل به وجوه شفاف چسبانده شده‌اند تا از تغییرشکل‌های جانبی ناخواسته جلوگیری نمایند. به منظور به حداقل رساندن اصطکاک مرزها در وجوه جلویی و عقبی جعبه، حین ساخت مدل، روغن سیلیکون به فصل مشترک بین ماسه و دیواره‌ها اضافه شد.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این جعبه از یک محفظه آزمایش، سیستم بارگذاری و سیستم ثبت داده تشکیل شده است. سیستم بارگذاری از یک قاب بارگذاری، جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰ تن و یک واحد تأمین فشار روغن تشکیل شده است. قاب بارگذاری شامل دو ستون فولادی با مقطع دایره‌ای توپر و یک تیر I شکل می‌باشد که این تیر به عنوان تکیه‌گاه جک هیدرولیکی عمل می‌کند. به منظور اطمینان از عدم وابستگی پاسخ خاک-پی به نرخ بارگذاری، این نرخ در حدود یک میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است. مقدار بار و جابجایی به‌صورت اتوماتیک با استفاده از سیستم

در عمقی به اندازه ۰/۲ برابر عرض پی قرار داده شدند. با این حال، آن‌ها دریافتند که افزایش پهنای لایه ژئوسل به اندازه بیشتر از دو برابر عرض پی از لبه سمت راست پی، برای محدوده نشست بیش از ۲۰٪ عرض پی، تأثیر کمی در افزایش ظرفیت باربری پی به همراه خواهد داشت. همچنین، با افزایش فاصله پی از تاج شیروانی، به دلیل افزایش حجم ناحیه مقاوم خاک سمت شیب، ظرفیت باربری هر دو مدل غیرمسلح و مسلح افزایش می‌یابد.

در محدوده بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله، مشخص شده است که بخش اعظم تحقیقات قبلی به بررسی رفتار پی نواری واقع بر شیروانی مسلح با زاویه شیب کم محدود می‌باشد (علمشاهی و هاتف، ۲۰۱۰؛ الصواف، ۲۰۰۷؛ مهرجردی و همکاران، ۲۰۱۶؛ سلوادوری و جناندران، ۱۹۸۹؛ یو، ۲۰۰۱). این تحقیقات روی رفتار پی واقع بر شیروانی با زاویه شیب بین ۲۰ الی ۴۵ درجه انجام شده است و کمتر تحقیقی برای زاویه شیب بیشتر از ۴۵ درجه انجام شده است. در این ارتباط، می‌توان به مطالعه انجام شده توسط چودهداری و همکاران (۲۰۱۰) اشاره نمود که برای زوایای شیب ۴۵ و ۶۰ درجه مطالعه آزمایشگاهی انجام داده‌اند. اما از آنجایی که به دلیل فضای محدود باید خاکریز با شیب زیاد اجرا نمود، نیاز به بررسی پایدارسازی شیروانی‌های خاکی و رفتار پی نواری واقع بر آنها (از قبیل پی دیوار بالای شیب) در نتیجه مسلح نمودن با ژئوسنتتیک‌ها، برای شیب‌های تند وجود دارد. شیروانی‌های مسلح با شیب زیاد را می‌توان برای اصلاح شیروانی‌های گسیخته شده، ایجاد خاکریزهای جدید، تعریض خاکریزهای موجود و همچنین به عنوان گزینه جایگزین دیوارهای نگهبان استفاده نمود (برگ و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین، نیاز به بررسی تأثیر پارامترهایی از قبیل عمق کارگذاری پی روی رفتار پی واقع بر شیروانی مسلح احساس می‌شود. از این‌رو، در این تحقیق، به بررسی تعداد لایه‌های ژئوسل،

۲-۱. تعریف مسأله

(شکل ۲). بایستی عنوان نمود که تمامی ابعاد در مقیاس مدل ارائه شده‌اند، به‌جز در مواردی که به آن‌ها در متن مقاله اشاره شده باشد.

هندسه مسأله مورد بررسی در مدل‌های آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. آزمایش‌های مدل برای شیروانی خاکی با ارتفاع $H=800$ mm و زاویه شیب 70° $\alpha=$ انجام شده است. یک پی صلب با پهنا 300 mm و $B=$ و طول 1095 mm در سطح شیروانی (یعنی $D=0$) و در عمق $D=100$ mm قرار داده شده است. جنس بخش پایینی پی از نوع فولادی با ضخامت 20 mm بوده و برای تأمین عمق کارگذاری، از تخته‌های چوبی با ضخامت مشابه روی صفحه فولادی استفاده شده است. فاصله بین دیواره سمت چپ پی و تاج شیروانی $b=200$ mm است. با توجه به عرض پی و ابعاد دستگاه، پی در حدود $2B$ از جداره دور از شیب فاصله دارد که با توجه به سازوکار گسیختگی پی روی شیروانی، فاصله ایمنی جهت دور شدن از اثرات مرز بر پاسخ‌ها می‌باشد.

۲-۲. مصالح مورد استفاده برای آزمایش
۲-۲-۱. خاک

خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها، ماسه بابلسر با مشخصات $D_{10}=0.17$ mm، $D_{50}=0.22$ mm، $D_{90}=0.39$ mm، $C_u=0.97$ ، $C_c=0.81$ ، $e_{max}=0.58$ و e_{min} می‌باشد که براساس سیستم طبقه‌بندی متحد در زمره خاک‌های ماسه بدانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد. تمام آزمایش‌ها برای خاک با دانسیته نسبی 60 درصد (متناظر با وزن مخصوص خشک $16/4$ kN/m³) و رطوبت 5 درصد انجام شده است. مشخصات مقاومتی ماسه برای دانسیته نسبی 60 درصد، که با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم تعیین شده است، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که مقدار تنش عمودی در آزمایش برش مستقیم در محدوده $25-125$ kPa بوده است.

به منظور ارزیابی تأثیر ژئوسل روی رفتار پی واقع بر شیروانی خاکی، لایه‌های ژئوسل با پهنا l طول mm 1100 ، ارتفاع $h=50$ mm و فاصله d بین آنها، در عمق u برای اولین لایه ژئوسل زیر کف پی قرار داده شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات ماسه بابلسر مورد استفاده در آزمایش‌های مدل

| مقدار | پارامتر |
|-------|---------------------------------------|
| ۶۰ | دانسیته نسبی، D_r (درصد) |
| ۲/۷۹ | توده ویژه، G_s |
| ۳۳ | زاویه اصطکاک پیک، ϕ_p (°) |
| ۲۹ | زاویه اصطکاک پسماند، ϕ_{res} (°) |
| ۳/۵ | زاویه اتساع، ψ (°) |

۲-۲-۲. ژئوسل

ژئوسل مورد استفاده برای آزمایش با استفاده از نوارهای ژئوتکستایل بافته نشده تهیه شده است. این ژئوتکستایل از جنس پلی‌پروپیلن می‌باشد و به عنوان مصالح مدل

شایان ذکر است که امکان انجام آزمایش روی خاک‌های با تراکم بیشتر وجود داشته است، اما برای اینکه بتوان تأثیر استفاده از ژئوسل در شیروانی‌های خاکی با تراکم کمتر را بررسی نمود، جهت انجام آزمایش‌ها از خاک با دانسیته نسبی متوسط استفاده شده است.

۱/۵۲ تعیین گردید. اندازه بازشدگی و ارتفاع ژئوسل آزمایشگاهی برابر mm ۵۰ می‌باشند. با توجه به ضریب مقیاس ۱۰، اندازه بازشدگی و ارتفاع ژئوسل در مقیاس واقعی برابر cm ۵۰ هستند که کمی بیشتر از ژئوسل‌های تجاری موجود در بازار می‌باشند. البته بایستی اشاره نمود که به دلیل مقاومت کم ژئوسل آزمایشگاهی، از نقطه نظر امکان انجام آزمایش‌ها و تراکم خاک داخل ژئوسل، استفاده از ژئوسل با ابعاد کوچکتر بسیار دشوار بود. تمام ابعاد ژئوسل در همه آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شد. الگوی ژئوسل آماده شده در شکل ۳ و مشخصات ژئوسل در جدول ۲ ارائه شده است.

آزمایشگاهی انتخاب شده است که مقاومت کششی بسیار کمی داشته باشد تا بتوان مصالح واقعی را با آن شبیه‌سازی نمود. مقاومت کششی نهایی ژئوتکستایل با استفاده از نمونه‌های با پهنای ۵۰ میلی‌متری با انجام آزمایش کشش براساس استاندارد ASTM D4595، برابر ۱/۴ kN/m تعیین شد. به منظور تهیه ژئوسل، نوارهای ژئوتکستایل با آرایش لانه زنبوری و اعضای قطری و عرضی به یکدیگر چسبانده شدند و بالا و پایین آن باز می‌باشد. برای ارزیابی مقاومت اتصال ژئوسل، نیروهایی به دو انتهای نمونه‌های با اتصال به یکدیگر اعمال شد تا زمانی که اتصال گسیخته شود (چن و چیو، ۲۰۰۸). مقاومت اتصال ژئوسل kN/m



شکل ۳. ژئوسل مورد استفاده در آزمایش‌های الگو

جدول ۲. مشخصات مصالح ژئوسل مورد استفاده در آزمایش

| مقدار | توصیف |
|-------|--------------------------------------|
| | ژئوتکستایل بافته نشده |
| ۸۰ | وزن واحد سطح ژئوتکستایل (gr/m^2) |
| ۰/۲۳ | ضخامت ژئوتکستایل (mm) |
| ۱/۴ | مقاومت کششی نهایی (kN/m) |
| ۰/۴۸ | مقاومت کششی در کرنش ۵٪ (kN/m) |
| ۱/۵۲ | مقاومت اتصال (kN/m) |

اولین لایه ژئوسل نسبت به کف پی در تمامی آزمایش‌ها به ترتیب برابر 300 mm و 50 mm است. دلیل انتخاب عمق قرارگیری 50 میلی‌متری برای ژئوسل، پیشنهاد دوش و همکاران (۲۰۰۷) می‌باشد که حداقل عمق را $0.1B$ توصیه نموده‌اند. از این‌رو، با توجه به عرض پی انتخاب شده، مقدار u برابر 50 mm انتخاب گردید. فاصله سمت چپ پی نسبت به تاج شیروانی نیز 200 mm می‌باشد. همچنین، ارتفاع ژئوسل در تمامی آزمایش‌ها به مقدار 50 mm ثابت باقی‌نگه داشته شد. دلیل عدم تغییر ارتفاع ژئوسل نیز دشوار بودن آماده‌سازی مدل با ژئوسل تهیه شده در این تحقیق بود. از آنجایی که برای لحاظ نمودن شرایط مقیاس درست، مقاومت کششی ژئوتکستایل بسیار کم انتخاب شد، با افزایش عمق ژئوسل، به راحتی قابل ثابت نگه داشتن در محل و ریختن خاک داخل آن نبود.

۲-۴. آماده سازی مدل و روش انجام آزمایش

خاک مدل آزمایشگاهی بر اساس تراکم به روش مرطوب آماده‌سازی شد. برای آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی، لایه‌های خاک ماسه‌ای به ضخامت‌های مساوی 50 میلی‌متری تقسیم‌بندی شدند و هر لایه با دانسیته خشک $16/4 \text{ kN/m}^3$ و رطوبت 5 درصد متراکم گردید تا دانسیته نسبی ماسه در حدود 60 درصد باقی‌ماند. از آنجایی که برای پایدار نگه داشتن شیروانی با خاک دانه‌ای در حالت غیرمسلح، نیاز به چسبندگی دارد، مقدار کمی آب به خاک اضافه شد تا با توجه به شرایط غیراشباع و مکش ماتریسی خاک، چسبندگی مورد نظر تأمین گردد. در آماده‌سازی مدل‌ها سعی گردید لایه‌ها با تراکم یکسانی کوبیده شوند. اما از آنجایی که تراکم لایه‌های بالایی ممکن است بر تراکم لایه‌های زیرین تأثیر بگذارد، جهت کاهش این اثر، لایه‌ها طوری متراکم شدند که یک ضخامت مشخصی از لایه‌ها با وزن مشخصی از خاک تشکیل شود و تراز لایه‌های کوبیده شده تغییر نکند. اما از آنجایی که اینکار

بایستی اشاره نمود که مدل شیروانی بر اساس نسبت مقیاس $S_F = 10$ طراحی شده است. به منظور حصول اطمینان از رفتار قابل مقایسه بین شیروانی در مقیاس مدل آزمایشگاهی و شرایط واقعی، مقاومت مصالح ژئوتکستایل با استفاده از ضریب $1/S_F^2$ مقیاس گردید (براساس پیشنهاد چن و چیو، ۲۰۰۸؛ ویسوانادام و کونینگ، ۲۰۰۸). مصالح ژئوتکستایل برای مدل طوری انتخاب شده است که تا حد ممکن نازک باشد و مقاومت کششی کمی داشته باشد تا بتوان رفتار درستی را از آن در مقیاس واقعی استنتاج نمود. همچنین، مقیاس مربوط به ابعاد خطی بین شرایط مدل آزمایشگاهی و شرایط واقعی (به‌طور مثال، ابعاد پی و مسلح‌کننده، عمق خاک و مقادیر جابجایی) $1/10$ انتخاب گردید. با توجه به نسبت مقیاس 10 و مقاومت کششی نهایی $1/4 \text{ kN/m}$ برای ژئوتکستایل آزمایشگاهی، نتایج آزمایش‌ها را می‌توان برای ژئوتکستایل واقعی با مقاومت کششی نهایی 40 kN/m تعمیم داد که در محدوده مقاومت نهایی ژئوتکستایل‌های موجود در بازار می‌باشد.

۲-۳. برنامه آزمایش‌ها

تعداد ۹ مدل آزمایشگاهی کوچک مقیاس برای شیروانی با ارتفاع 800 mm و زاویه شیب 70° با تعداد ژئوسل‌های متفاوت، موقعیت‌های مختلف ژئوسل، پهنای متفاوت ژئوسل و عمق‌های کارگذاری متفاوت پی انجام شده است. متغیرها برای آزمایش‌های مدل به شرح زیر می‌باشند:

۱- تعداد ژئوسل (N): یک، دو، سه و چهار

۲- فاصله بین ژئوسل‌ها (d): 75 mm و 100 mm

۳- عمق کارگذاری پی (D): صفر و 100 mm

۴- پهنای کل ژئوسل (L): 650 mm ، 770 mm

مشخصات آزمایش‌های مدل به همراه دلایل انجام هر یک آزمایش‌ها به‌طور خلاصه در جدول ۳ آورده شده است. بایستی اشاره نمود که عرض پی و عمق قرارگیری

بسیار دشوار بوده و احتمال تراکم لایه‌های زیرین وجود دارد، سعی شده است شرایط تراکم خاک در مدل‌های مختلف یکسان باشد.

جدول ۳. خلاصه آزمایش‌های مدل انجام شده در این تحقیق

| آزمایش | نوع | تعداد لایه‌های ژئوسل، N | فاصله اولین ژئوسل، u (mm) | پهنای ژئوسل، L (mm) | فاصله بین ژئوسل‌ها، d (mm) | عمق کارگذاری پی، D (mm) | دلیل انجام آزمایش |
|--------|---------|-------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ۱ | غیرمسلح | - | - | - | - | ۰/۰ | |
| ۲ | ژئوسل | ۱ | ۵۰ | ۶۵۰ | - | ۰/۰ | بررسی تأثیر |
| ۳ | ژئوسل | ۲ | ۵۰ | ۶۵۰ | ۵۰ | ۰/۰ | تعداد لایه‌های |
| ۴ | ژئوسل | ۳ | ۵۰ | ۶۵۰ | ۷۵ | ۰/۰ | ژئوسل و فاصله |
| ۵ | ژئوسل | ۴ | ۵۰ | ۶۵۰ | ۷۵ | ۰/۰ | بین آنها |
| ۶ | ژئوسل | ۳ | ۵۰ | ۶۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۰ | |
| ۷ | غیرمسلح | - | - | - | - | ۱۰۰ | بررسی تأثیر |
| ۸ | ژئوسل | ۳ | ۵۰ | ۶۵۰ | ۷۵ | ۱۰۰ | عمق کارگذاری پی |
| ۹ | ژئوسل | ۳ | ۵۰ | ۷۷۰ | ۷۵ | ۰/۰ | بررسی تأثیر پهنای ژئوسل |

با اتمام ساخت مدل، بارسنج و جابجایی‌سنج‌ها در محل مورد نظر قرار داده شده و به سیستم داده‌برداری متصل گردیدند. پس از حصول اطمینان از صحت عملکرد تجهیزات نصب شده، اعمال جابجایی به پی با جک هیدرولیکی با سرعت ۱/۰ mm/min انجام گردید.

۳. نتایج و بحث

از آنجایی که هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تأثیر وجود ژئوسل در بهبود ظرفیت باربری پی واقع بر بالای شیروانی خاکی است، نتایج مربوط به تأثیر تسلیح شیروانی با ژئوسل نسبت به نتایج متناظر به دست آمده برای پی واقع بر شیروانی غیرمسلح در ادامه ارائه شده است. این نتایج، در قالب تغییر در ظرفیت باربری، دوران پی و جابجایی افقی تاج شیروانی بررسی شده‌اند.

زمانی که لایه خاک به سطح زیرین اولین لایه ژئوسل رسید، ژئوسل روی سطح خاک پهن شده و در محل خود با یک سری میخ ثابت گردید. سپس، خاک با دقت داخل سلول‌های ژئوسل ریخته شده و با یک چکش فلزی کوچک، تراکم خاک انجام گردید. تراکم خاک به همین ترتیب ادامه پیدا نموده و خاک تا سطح زیرین پی متراکم شد. در صورتی که پی سطحی باشد، پی صرفاً در محل مورد نظر قرار داده شد. برای پی کارگذاری شده در عمق، پس از قرار دادن پی در محل خود، خاک اطراف تا تراز سطح زمین متراکم گردید. بایستی اشاره نمود از آنجایی که پی به صورت نواری می‌باشد، تمام لایه‌های ژئوسل با طولی برابر طول کل جعبه آزمایش در عمق مورد نظر قرار داده شد. پس از اتمام تراکم خاک و پر نمودن جعبه تا تراز مورد نظر، ترانشه‌ای با زاویه شیب شیروانی حفر گردید تا مدل شیروانی آماده شود.

۳-۱. تأثیر استفاده از ژئوسل

به منظور بررسی تأثیر استفاده از ژئوسل در پایدارسازی شیروانی خاکی و افزایش ظرفیت باربری پی نواری بالای شیروانی، تعداد متفاوت لایه‌های ژئوسل (یک، دو، سه و چهار لایه) با عمق قرارگیری اولین لایه (u) ۵۰ mm مورد آزمایش قرار گرفتند. در این حالت، پی در سطح شیروانی و در عمق ۱۰ سانتی‌متر قرار داده شد. همچنین، فاصله بین ژئوسل‌ها در مدل‌های مختلف برابر ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که برای بررسی تأثیر یک پارامتر، سایر پارامترها در آن مدل ثابت باقی‌نگه داشته شدند.

۳-۱-۱. ظرفیت باربری پی واقع بر شیروانی

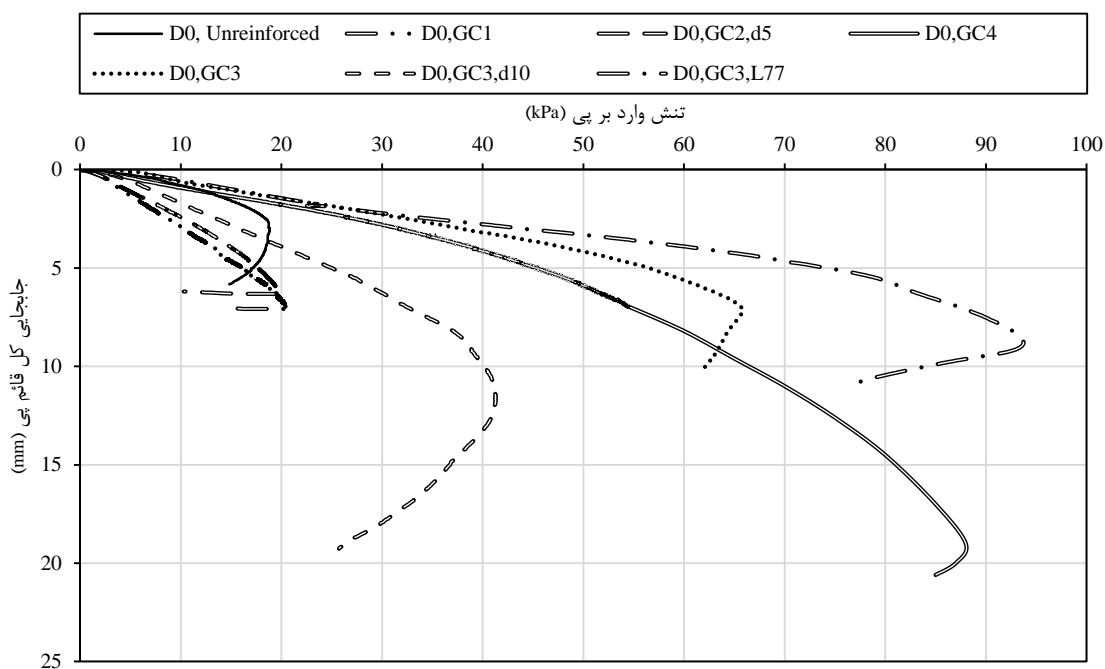
۳-۱-۱-۱. تعداد لایه‌های ژئوسل

شکل ۳، نمودار تنش-جابجایی قائم را برای پی نواری واقع بر بالای شیروانی خاکی غیرمسلح و شیروانی خاکی مسلح شده با ژئوسل در مدل‌های آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس نشان می‌دهد. نتایج برای پی مستقر بر سطح بالایی شیروانی (یعنی $D=0$) و پی مستقر در عمق $D=100$ mm به ترتیب در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب ارائه شده‌اند. همانطور که در شکل ۳-الف دیده می‌شود، در حالت بدون مسلح‌کننده، گسیختگی پی مستقر بر سطح بالای شیروانی در فشار وارده ۱۸ کیلوپاسکال و در نشست حدود ۳ میلی‌متر اتفاق می‌افتد که این عدد برای حالتی که از یک، دو، سه و چهار لایه ژئوسل استفاده شده است به ترتیب برابر با ۲۰، ۲۰، ۶۵ و ۸۸ کیلوپاسکال در نشست‌های معادل ۶، ۷، ۷ و ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد زمانی که از یک یا دو لایه ژئوسل برای تسلیح شیروانی استفاده گردید، تأثیری بر ظرفیت باربری پی واقع بر شیروانی نداشته است. همانطور که در

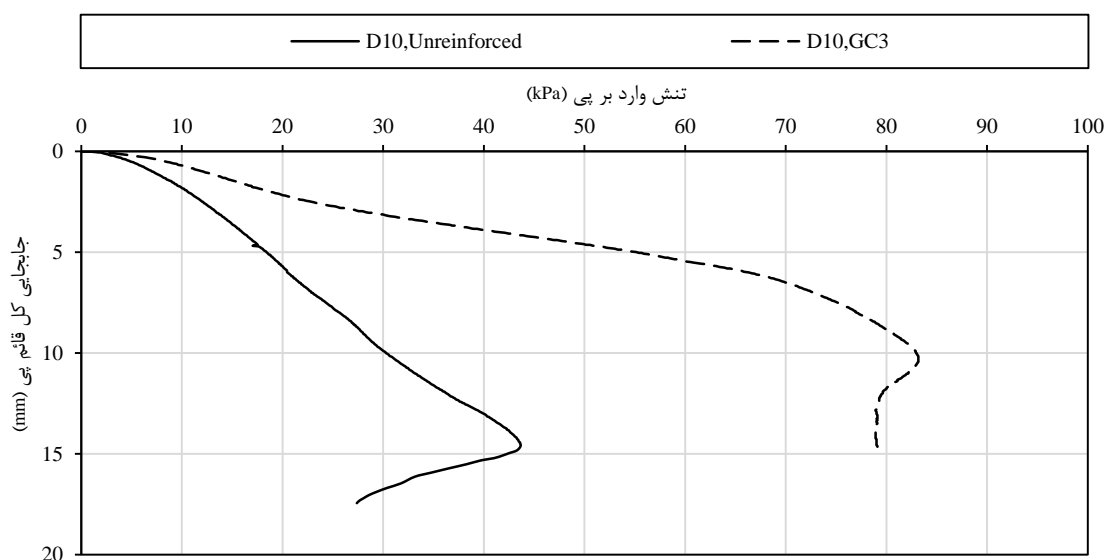
شکل ۴ نشان داده شده است، با بررسی گسیختگی ایجاد شده در مدل شیروانی مسلح با دو لایه ژئوسل (یعنی تغییر در امتداد لایه‌های ماسه رنگی و مشاهده برش ایجاد شده در خاک) مشخص گردید که گسیختگی از زیر لایه ژئوسل تحتانی شروع شده و تا سطح شیروانی ادامه پیدا نمود. بنابراین، این تعداد ژئوسل تأثیر خاصی در افزایش ظرفیت باربری پی نداشته است. دلیل این موضوع را می‌توان در عملکرد غشایی ژئوسل جستجو نمود که بار وارده به سطح شیروانی را در عمق و پهنای بیشتری توزیع می‌کند. بنابراین، با توزیع بار وارده به زیر لایه دوم، خاک آن بخش دچار گسیختگی می‌شود. از این‌رو، تعداد مشخصی از لایه‌های ژئوسل برای پایدارسازی شیروانی و افزایش ظرفیت باربری پی مورد نیاز است.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزودن لایه سوم ژئوسل به شیروانی، گسیختگی در شیروانی به راحتی تشکیل نشده و ظرفیت باربری پی به شدت افزایش پیدا کرد. در این خصوص، ظرفیت باربری پی مستقر بر بالای سطح شیروانی مسلح با سه لایه ژئوسل $3/6$ برابر و برای چهار لایه ژئوسل $4/9$ برابر حالت شیروانی غیرمسلح می‌باشد. افزایش در مقدار ظرفیت باربری پی با افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل را می‌توان به سازوکار مسلح‌کنندگی ناشی از افزایش مقاومت در بخش مقاوم زیر پی، قفل و بست بین خاک و ژئوسل، محصورکنندگی خاک توسط ژئوسل و عملکرد غشایی ژئوسل نسبت داد. بایستی یادآوری نمود که افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده همواره باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری نخواهد شد و بعد از یک تعداد مشخصی مسلح‌کننده، به ازای نشست یکسان، ظرفیت باربری ممکن است تغییر چندانی نداشته باشد. این موضوع در تحقیقات الصواف (۲۰۰۷) و علمشاهی و هاتف (۲۰۰۹) نیز مشاهده شده است.

بررسی آزمایشگاهی تأثیر ژئوسل در رفتار پی نواری واقع بر شیروانی خاکی

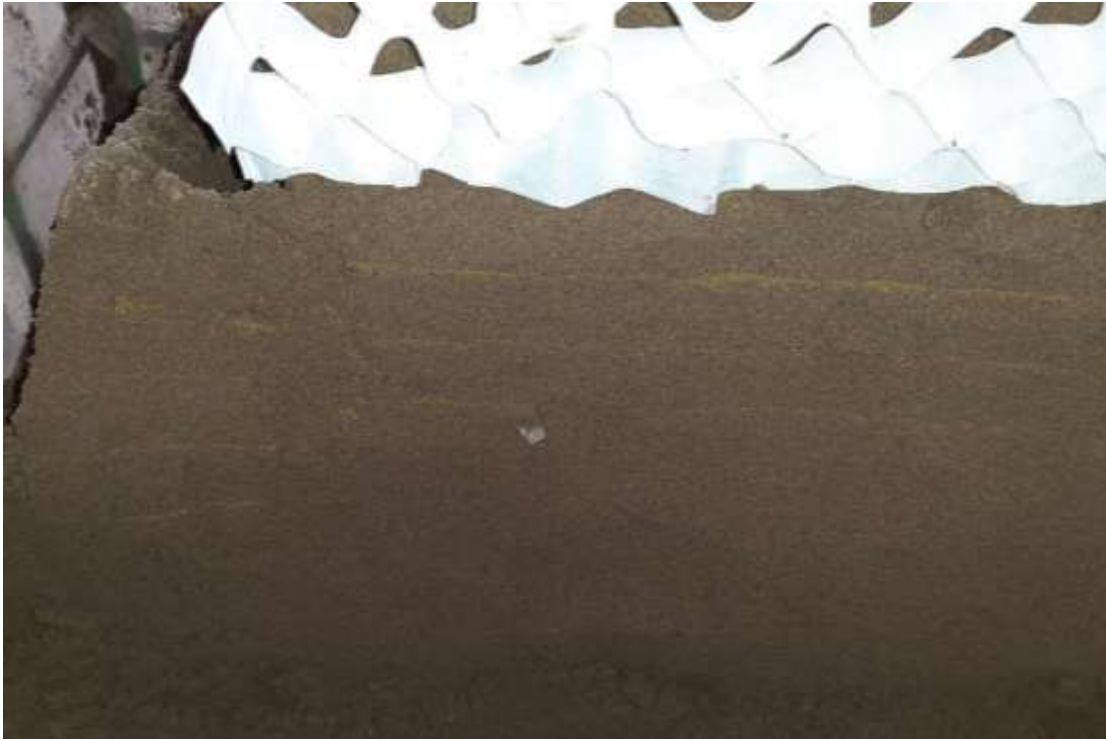


(الف) پی بر سطح بالایی شیروانی $D=0$

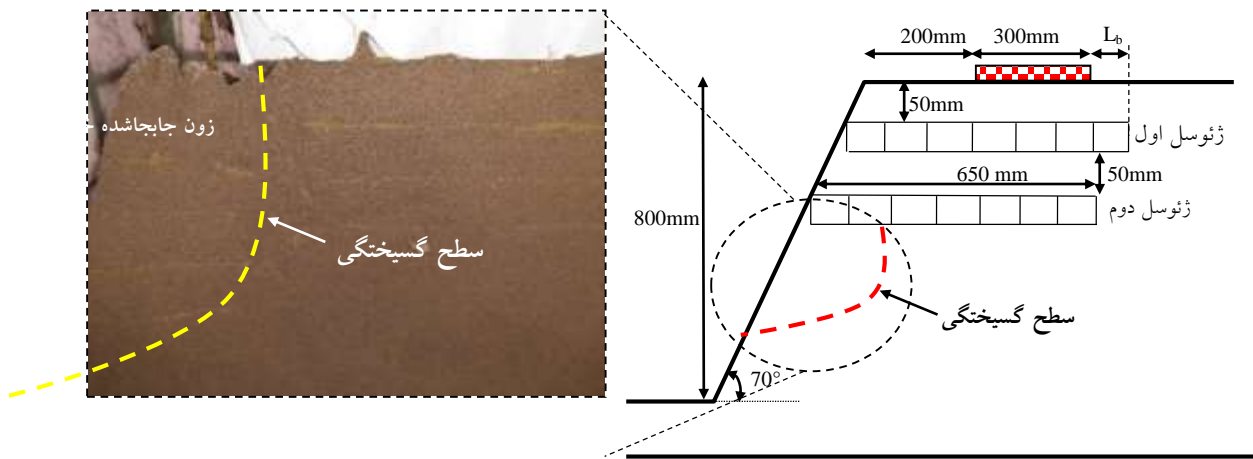


(ب) پی در عمق $D=100 \text{ mm}$

شکل ۳. نمودار تنش - جابه‌جایی قائم پی مستقر بر شیروانی برای مسلح‌کننده ژئوسل و حالت غیرمسلح (برای مواردی که در نام‌گذاری آزمایش، فاصله و پهناي ژئوسل ذکر نشده‌اند، این پارامترها به ترتیب برابر ۷۵ و ۶۵۰ میلی‌متر می‌باشند)



(الف) نمای کلی شیروانی گسیخته شده در زیر آخرین لایه ژئوسل



(ب) نمای از نزدیک بخش گسیخته شده شیروانی

(ج) مدل شماتیک گسیختگی

شکل ۴. نحوه انتشار گسیختگی در شیروانی برای حالت مسلح شده با دو لایه ژئوسل

واقع بر بالای شیروانی خاکی خواهد شد. دلیل این تفاوت را می توان به پارامترهایی از قبیل نوع خاک شیروانی، فاصله پی از لبه شیروانی و زاویه شیب شیروانی مورد آزمایش در مدل ها نسبت داد. در تحقیق فهلیانی و همکاران (۲۰۲۱) حداکثر مقدار شیب شیروانی برابر 35° انتخاب شده بود. در حالی که در این تحقیق، زاویه شیب

به طور کلی نتایج نشان دادند که در صورت عدم وجود تعداد کافی لایه های مسلح کننده، ظرفیت باربری نهایی شیروانی مسلح تغییری نسبت به حالت غیرمسلح نخواهد داشت. شایان ذکر است که چودهاری و همکاران (۲۰۱۰) و فهلیانی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که وجود یک لایه ژئوسل موجب افزایش ظرفیت باربری پی

برابر 70° است. پر واضح است که با کاهش شیب شیروانی، رفتار پی واقع بر آن نزدیک به پی واقع بر زمین مسطح و بدون شیب خواهد بود. در این حالت، بخش مقاوم گسیختگی تشکیل شده در زیر پی به مراتب بزرگتر از شیروانی با شیب زیاد است. این در حالی است که چودهاری و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی رفتار شیروانی مسلح در خاک نسبتاً چسبنده با زاویه شیب 45° و 60° و فاصله پی از لبه شیب بیشتر از عرض پی پرداختند. در این شرایط، علی‌رغم زیاد بودن شیب، به‌کارگیری یک لایه مسلح‌کننده در شیروانی افزایش ظرفیت باربری را به همراه داشت. اگرچه، ظرفیت باربری شیروانی غیرمسلح برای زاویه شیب 60° و موقعیت پی در فاصله B از لبه شیروانی، 60 kPa بوده است. این در حالی است که نوع خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع دانه‌ای با چسبندگی کم بوده و ظرفیت باربری در حالت غیرمسلح، برای موقعیت پی در فاصله $0.67B$ از لبه شیروانی (B عرض پی)، در حدود 20 kPa به‌دست آمد. از این‌رو، می‌توان اشاره نمود که پارامترهای دیگری از قبیل نوع خاک شیروانی و فاصله پی از لبه شیب نیز در این موضوع تأثیرگذار هستند. در نتیجه، زمانی که پی روی بخش بالایی شیروانی با شیب تند، خاک با چسبندگی نسبتاً کم و نزدیک به لبه شیروانی قرار می‌گیرد، بخش مقاوم گسیختگی خاک کوچک بوده و وجود تعداد لایه‌های ناکافی مسلح‌کننده تأثیر خاصی در افزایش ظرفیت باربری نخواهد داشت.

۳-۱-۲. فاصله بین ژئوسل‌ها

از آنجایی که با به‌کارگیری سه لایه ژئوسل، مقدار ظرفیت باربری پی بالای سطح شیروانی مسلح به‌طور قابل توجهی افزایش یافت، به منظور بررسی تأثیر سایر پارامترها روی رفتار شیروانی مسلح، با ثابت نگه داشتن تعداد لایه‌های ژئوسل برابر سه لایه، پارامتر مورد نظر تغییر داده شد.

با افزایش فاصله بین ژئوسل‌ها از ۷۵ به ۱۰۰ میلی‌متر برای شیروانی مسلح با سه لایه ژئوسل، همچنان افزایش ظرفیت باربری پی نسبت به حالت شیروانی غیرمسلح مشاهده می‌شود (شکل ۳-الف). مقدار ظرفیت باربری پی در این حالت برابر ۴۲ کیلوپاسکال در نشست معادل ۱۲ میلی‌متر می‌باشد که $2/3$ برابر ظرفیت باربری پی در حالت غیرمسلح است. با این حال، زمانی که فاصله بین ژئوسل‌ها افزایش می‌یابد، سختی مجموعه شیروانی مسلح نیز کاهش می‌یابد و شیروانی جابجایی‌های افقی و قائم بیشتری را تجربه می‌کند (شکل ۳-الف). همچنین، با افزایش فاصله بین مسلح‌کننده‌ها، ظرفیت باربری پی مستقر بر بالای شیروانی مسلح با ژئوسل به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به نوع گسیختگی شیروانی خاکی نسبت داد. زمانی که فاصله بین ژئوسل‌ها افزایش می‌یابد جابجایی قائم و افقی در محدوده بین دو مسلح‌کننده تقریباً مشابه حالت غیرمسلح است و احتمال شکل‌گیری گسیختگی برشی در این ناحیه وجود دارد.

۳-۱-۳. طول ژئوسل‌ها

فهلپانی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که برای شیروانی‌های مسلح با ژئوسل که طول مسلح‌کننده حداکثر تا لبه سمت راست پی (لبه دور از تاج شیروانی) ادامه یابد (یعنی $L_b = 0$ در شکل ۲) نیز ظرفیت باربری حالت مسلح نسبت به حالت غیرمسلح افزایش چشمگیری خواهد داشت. همچنین، آنها نتیجه گرفتند که برای مقادیر L_b بیشتر از صفر (یعنی $L_b = 1B, 2B, 3B$) تغییر محسوسی در مقدار ظرفیت باربری دیده نمی‌شود که B عرض پی می‌باشد. بایستی اشاره نمود که شیب شیروانی در این حالت برابر 35° بوده و حتی می‌توان ادعا نمود که نتایج آنها تا حدود بسیار زیادی شبیه به حالت پی واقع بر زمین مسطح می‌باشد. به همین دلیل، طول ژئوسل تأثیر قابل توجهی بر نتایج آن‌ها نداشته است. اما از

ژئوسل با فواصل ۷۵ میلی‌متر بیشترین مقدار ظرفیت باربری را نتیجه داد، برای پی کارگذاری شده در عمق نیز این فواصل برای ژئوسل‌ها ثابت باقی ننگه داشته شدند. زمانی که پی در عمق ۱۰۰ میلی‌متری شیروانی غیرمسلح قرار می‌گیرد ظرفیت باربری به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به پی واقع بر سطح شیروانی افزایش می‌یابد. برای این حالت، ظرفیت باربری پی ۴۳ کیلوپاسکال در نشست معادل ۱۵ میلی‌متر می‌باشد که این مقدار ۲/۴ برابر حالتی است که پی در سطح قرار دارد. برای پی کارگذاری شده در عمق و مسلح‌شده با سه لایه ژئوسل، ظرفیت باربری پی ۸۳ کیلوپاسکال در نشست معادل ۱۰ میلی‌متر می‌باشد که این مقدار ۱/۳ برابر حالت مشابه برای پی واقع در سطح می‌باشد. همچنین، ظرفیت باربری پی کارگذاری شده در عمق برای شیروانی مسلح با سه لایه ژئوسل حدود ۱/۹ برابر حالت غیرمسلح است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری پی واقع در عمق نسبت به پی واقع در سطح بیشتر بوده، اما کارایی مسلح‌کننده ژئوسل برای پی‌های واقع در سطح بیشتر می‌باشد. دلیل افزایش میزان ظرفیت باربری پی کارگذاری شده در عمق را می‌توان به تغییر ناحیه مقاوم گسیختگی زیر پی با تغییر در عمق کارگذاری پی نسبت داد. واضح است که با افزایش عمق کارگذاری پی، ناحیه مقاوم گسیختگی زیر پی بزرگتر شده و در نتیجه پی، ظرفیت باربری بیشتری را تجربه خواهد نمود. اگرچه، کاهش کارایی ژئوسل برای پی کارگذاری شده در عمق نسبت به پی واقع بر سطح را می‌توان به تفاوت در مقدار طول ادامه یافته ژئوسل از گوشه سمت راست پی (یعنی L_b در شکل ۲) در این دو حالت نیز نسبت داد. زیرا، این طول برای پی واقع بر سطح و پی با عمق $D = 100 \text{ mm}$ به ترتیب برابر ۱۳۰ میلی‌متر و ۹۵ میلی‌متر است که با کاهش آن برای پی کارگذاری شده در عمق، مقدار ظرفیت باربری پی نیز متناسب با آن افزایش نیافته است.

آنجایی که شیب شیروانی در این تحقیق برابر 70° می‌باشد، مقادیر بیشتری برای طول ژئوسل با مقدار L_b/B برابر $0/45$ ($L = 650 \text{ mm}$) و $0/85$ ($L = 770 \text{ mm}$) انتخاب شده است. همانطور که در شکل ۳- الف مشخص است، با افزایش طول ژئوسل از $L_b/B = 0/45$ به $0/85$ نیز افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری پی مشاهده شده است. مقدار ظرفیت باربری پی در حالت $L_b/B = 0/85$ برابر ۹۴ کیلوپاسکال در نشست معادل ۹ میلی‌متر می‌باشد که ۵/۲ برابر ظرفیت باربری پی در حالت غیرمسلح است. همانطور که مشخص است، افزایش طول ژئوسل از $L_b/B = 0/45$ به $L_b/B = 0/85$ موجب می‌شود که مقدار افزایش ظرفیت باربری به ترتیب برابر ۳/۶ و ۵/۲ برابر حالت غیرمسلح باشد. از این رو، افزایش L_b در شیروانی‌های با شیب زیاد، باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری پی خواهد شد. این موضوع را می‌توان به بسیج شدن کرنش زیاد در ژئوسل در ناحیه گسیختگی سمت راست پی (لبه دور از تاج شیروانی) نسبت داد. اگرچه، یو (۲۰۰۱) نشان داد که مقدار کرنش زیادی در شیروانی مسلح، در ژئوگرید بخش راست پی ایجاد نخواهد شد. دلیل این تفاوت را نیز می‌توان به تفاوت زاویه شیب شیروانی نسبت داد که در تحقیق یو (۲۰۰۱) شیب شیروانی حدوداً 35° بوده است.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که جهت افزایش کارایی ژئوسل‌ها در افزایش ظرفیت باربری پی مستقر بر بالای شیروانی، تعداد لایه‌های ژئوسل، نحوه آرایش و طول آن‌ها بسیار حائز اهمیت هستند.

۳-۱-۴. عمق کارگذاری پی

همانطور که پیش‌تر بیان شد، شکل ۳- ب نتایج به‌کارگیری ژئوسل را برای تسلیح خاک زیر پی کارگذاری شده در عمق نشان می‌دهد. با توجه به اینکه برای پی واقع بر سطح بالایی شیروانی (یعنی $D = 0$),

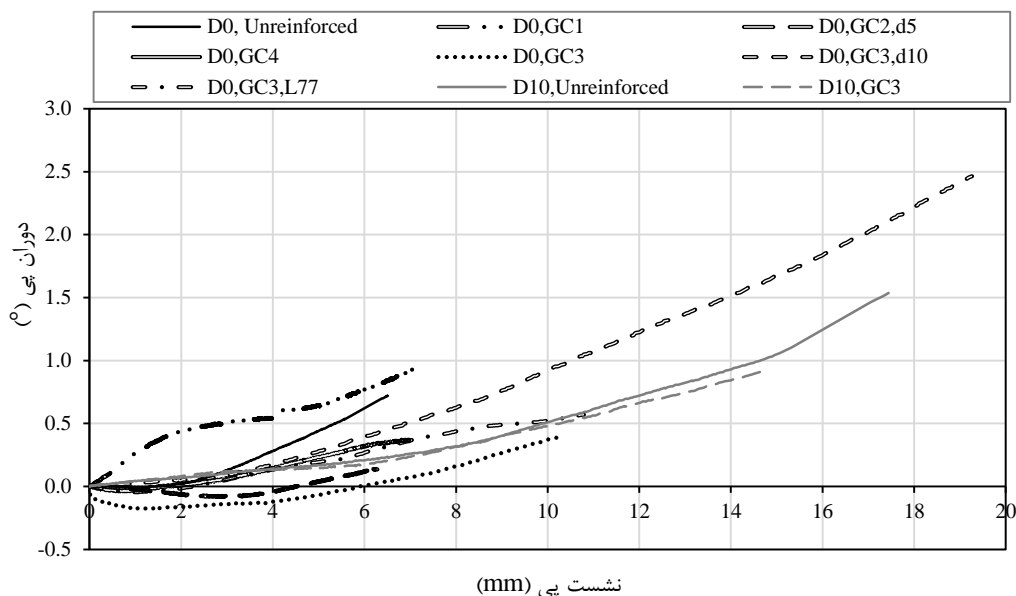
۱-۲-۳. دوران پی واقع بر شیروانی

شکل ۵، نمودار نشست- دوران پی را برای پی نواری واقع بر شیروانی خاکی غیرمسلح و شیروانی خاکی مسلح با یک، دو، سه و چهار لایه ژئوسل نشان می‌دهد. شایان ذکر است که دوران‌های مثبت و منفی به ترتیب دوران پادساعتگرد و ساعتگرد را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل دیده می‌شود، برای حالت‌هایی که پی در سطح قرار دارد، دوران پی برای حالت غیرمسلح و مسلح با یک لایه ژئوسل همواره پادساعتگرد می‌باشد. در حالی که برای حالتی که از دو، سه و چهار لایه ژئوسل استفاده شده است ابتدا ساعتگرد و سپس پادساعتگرد می‌باشد. این بدان معنی است که استفاده از ژئوسل موجب تغییر در سازوکار گسیختگی پی واقع بر شیروانی شده است. دلیل دوران پادساعتگرد پی را نیز می‌توان به فاصله پی از تاج شیروانی نسبت داد که نزدیک شدن پی به تاج شیروانی باعث کاهش بخش مقاوم گسیختگی زیر پی و کج شدن پی به سمت بخش شیب‌دار شیروانی خواهد شد. هوانگ و همکاران (۱۹۹۴) نیز نشان دادند که با نزدیک شدن پی به تاج شیروانی (یعنی کاهش فاصله بین لبه سمت چپ پی و تاج شیروانی) پی به سمت تاج کج شده و دوران پادساعتگرد را تجربه خواهد نمود. شایان ذکر است که همچنین با افزایش فاصله بین ژئوسل‌ها به ۱۰۰ میلی‌متر، مقدار دوران پی به شدت افزایش پیدا کرد که به دلیل کاهش سختی مجموعه شیروانی مسلح می‌باشد. در بقیه

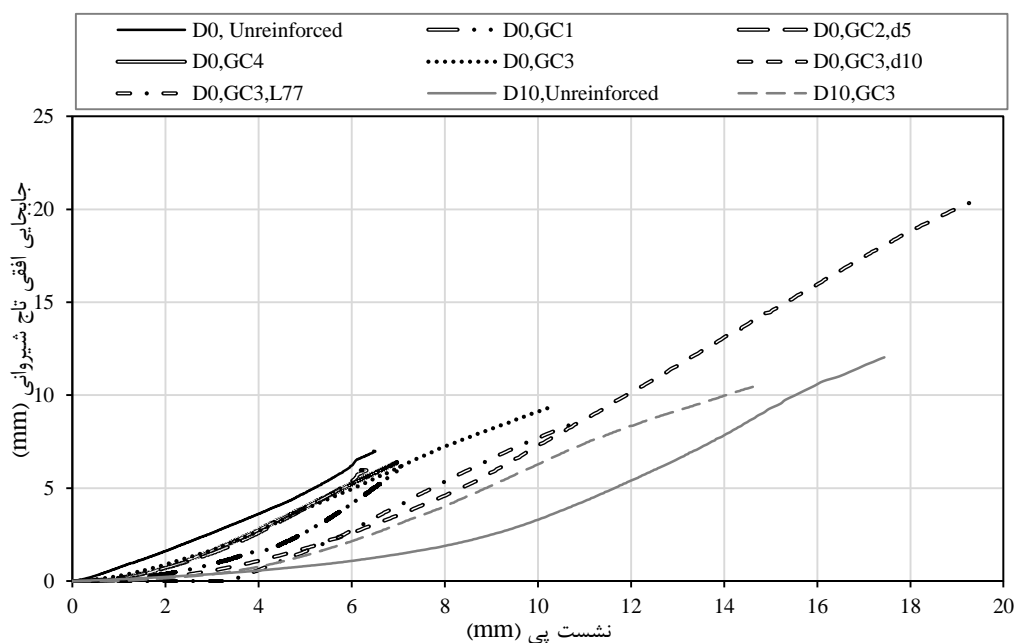
موارد، پی واقع بر شیروانی مسلح با ژئوسل، دوران کمتر از یک درجه را تجربه نموده است.

۳-۱-۳. جابه‌جایی افقی تاج شیروانی

شکل ۶، نمودار نشست- جابه‌جایی افقی تاج شیروانی را برای پی نواری واقع بر شیروانی خاکی غیرمسلح و شیروانی خاکی مسلح با یک، دو، سه و چهار لایه ژئوسل نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی تاج شیروانی، جابجایی سنج در قسمت نزدیک به تاج شیروانی و بالای مسلح‌کننده ژئوسل نصب شده بود. همانطور که از شکل برمی‌آید، برای نشست ۵ میلی‌متر، مقدار جابه‌جایی افقی تاج شیروانی در حالت غیرمسلح تقریباً ۵ میلی‌متر و برای حالت‌های مسلح با ژئوسل به طور میانگین تقریباً ۲ میلی‌متر می‌باشد. اگرچه مقادیر جابجایی به‌طور کلی در محدوده کمی قرار دارد اما نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مسلح‌کننده ژئوسل باعث کاهش جابه‌جایی افقی تاج شیروانی نسبت به حالت غیر-مسلح می‌شود. این موضوع به دلیل افزایش سختی شیروانی مسلح با ژئوسل و انتقال بار پی به عمق‌های بیشتر توسط ژئوسل‌ها است که موجب کاهش جابجایی-های افقی و قائم در شیروانی شده است. با افزایش فاصله بین ژئوسل‌ها به ۱۰۰ میلی‌متر نیز مشخص است که شیروانی جابجایی افقی بیشتری را تجربه کرده است. همچنین، در حالتی که پی در عمق قرار دارد، به ازای نشست مشخص، جابه‌جایی افقی تاج شیروانی کمترین مقدار خود را نسبت به سایر حالت‌ها دارد.



شکل ۵. نشست- دوران پی مستقر بر شیروانی خاکی غیر مسلح و مسلح با ژئوسل



شکل ۶. نشست- جابه‌جایی افقی تاج شیروانی برای حالت غیرمسلح و مسلح با ژئوسل (برای مواردی که در نام‌گذاری آزمایش، فاصله و پهناي ژئوسل ذکر نشده‌اند، این پارامترها به ترتیب برابر ۷۵ و ۶۵۰ میلی‌متر می‌باشند)

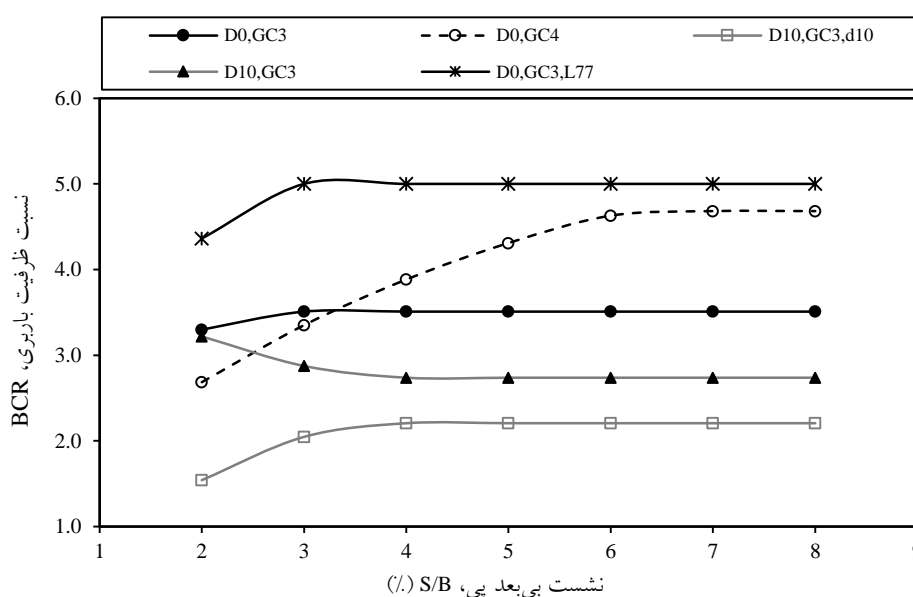
پرداخته شده است. برای مقایسه کارایی ژئوسل از اصطلاح نسبت ظرفیت باربری ($BCR^1 = q_r / q_{ur}$) استفاده شده است، که q_r و q_{ur} به ترتیب ظرفیت باربری پی نواری واقع بر شیروانی خاکی مسلح و شیروانی غیرمسلح معادل

۲-۳. بررسی کارایی ژئوسل در رفتار پی واقع بر شیروانی
در این بخش، به مقایسه عملکرد ژئوسل در افزایش ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر شیروانی خاکی

¹ Bearing capacity ratio

این رو، می‌توان بیان نمود که با افزایش بیشتر تعداد ژئوسل‌ها، ظرفیت باربری افزایش چشمگیری پیدا خواهد کرد. در این شرایط، شکل‌گیری گسیختگی از زیر آخرین لایه ژئوسل اتفاق نخواهد افتاد و برای گسیخته شدن شیروانی، خود ژئوسل‌ها باید گسیخته شوند. برای تمام مقادیر نشست بی‌بعد پی، کارایی ژئوسل در حالتی که فاصله مسلح‌کننده‌ها از هم ۷۵ میلی‌متر است بیشتر از حالتی است که فاصله مسلح‌کننده‌ها از هم ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

هم در یک مقدار نشست مشخص پی می‌باشند. همچنین، مقایسه نسبت ظرفیت باربری، برای سطوح مختلف نشست بی‌بعد شده پی، s/B ، انجام شده است که s مقدار نشست پی و B عرض آن می‌باشد. شکل ۷، نمودار نسبت ظرفیت باربری (BCR)، به نشست بی‌بعد (s/B) برای مدل‌های شیروانی مسلح‌شده با ژئوسل را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، افزایش تعداد مسلح‌کننده از سه به چهار، موجب افزایش قابل توجه نسبت ظرفیت باربری پی واقع بر شیروانی شده است. از



شکل ۷. نسبت ظرفیت باربری به نشست بی‌بعد برای شیروانی‌های مسلح‌شده با ژئوسل (برای مواردی که در نام‌گذاری آزمایش، فاصله و پهنای ژئوسل ذکر نشده‌اند، این پارامترها به ترتیب برابر ۷۵ و ۶۵۰ میلی‌متر می‌باشند)

افزایش می‌یابد، اما طول ادامه یافته ژئوسل از گوشه سمت راست پی کاهش می‌یابد و در مجموع کارایی آن کاهش خواهد یافت. با افزایش عرض ژئوسل، کارایی آن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این خصوص، با افزایش عرض مسلح‌کننده‌ها، مقدار BCR در نشست بی‌بعد ۸ درصد برای ژئوسل از ۳/۵ به ۵ افزایش کرده است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش طول بیرون‌کشیدگی ژئوسل در سازوکارهای گسیختگی زیر

همانطور که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، با افزایش عمق کارگذاری، ظرفیت باربری پی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با این وجود، با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که با کارگذاری پی در عمق ۱۰۰ میلی‌متری، کارایی مسلح‌کننده‌ها نسبت به حالتی که پی در سطح شیروانی قرار داد کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به کاهش طول ادامه یافته ژئوسل از گوشه سمت راست پی با افزایش عمق پی نسبت داد. هرچند، با افزایش عمق پی، بخش مقاوم گسیختگی زیر پی

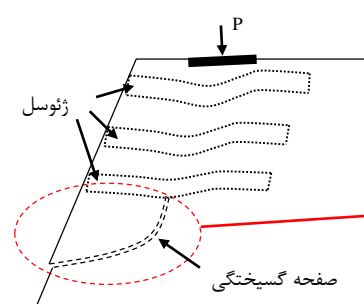
شکل ۸، سازوکار گسیختگی مدل شیروانی مسلح شده با ژئوسل با فاصله مسلح کننده ۷۵ میلی متر را نشان می دهد. برای مدل های شیروانی مسلح با ژئوسل، مشاهده گردید که عملکرد غشایی ژئوسل موجب شده است بار به لایه های زیرین خاک منتقل شده و گسیختگی در زیر لایه های ژئوسل رخ دهد. برای فاصله ژئوسل ۷۵ میلی متر، گسیختگی در زیر آخرین لایه شروع شده و به سطح شیب می رسد و هیچ گونه ترک کششی در اطراف پی و سطح شیروانی قبل از آخرین لایه ژئوسل مشاهده نشده است. اما برای فاصله ژئوسل ۱۰۰ میلی متر، گسیختگی به کمی بالاتر منتقل شده و از زیر لایه دو ژئوسل شروع به انتشار نمود. اما موضوعی که کاملاً مشهود بود این است که ژئوسل باعث انتقال بارهای وارده از پی به لایه های زیرین شده و در صورتی که تعداد لایه های بیشتری از این نوع مسلح کننده در شیروانی قرار داده شود قاعدتاً ظرفیت باربری پی افزایش خواهد یافت. همچنین، اثرات قابل توجه ناشی از بارگذاری و جابجایی شیروانی از قبیل ترک کششی، تقریباً در سطح شیروانی مشاهده نشده است.

پی نسبت داد و نیروی بیشتری توسط ژئوسل تحمل خواهد شد.

۳-۳. سازوکار گسیختگی شیروانی مسلح با

ژئوسل

بر اساس مشاهدات انجام شده در آزمایش های مدل فیزیکی کوچک مقیاس شیروانی ماسه ای، مشخص گردید که استفاده از ژئوسل می تواند به طور قابل توجهی ظرفیت باربری پی مستقر بر شیروانی را بهبود بخشد. نقش مؤثر ژئوسل در افزایش ظرفیت باربری پی ثابت می کند که ممکن است سازوکارهای گسیختگی متفاوتی در شیروانی های غیرمسلح و مسلح شده تشکیل شود. سازوکارهای گسیختگی مدل های شیروانی با توجه به پاسخ پی به بار اعمال شده و همچنین بر اساس مشاهده جابجایی لایه های خاک- مسلح کننده در حین آزمایش بارگذاری و پس از گسیختگی شیروانی، مطالعه شده است. علاوه بر این، هم رفتار بار- نشست و هم شکل سطح گسیختگی شیروانی های مسلح شده با چیدمان اعضای مسلح کننده به روش های مختلف به طور قابل توجهی در سازوکارهای گسیختگی تأثیرگذار است.



(ب) شکل شماتیک نحوه شکل گیری سازوکار گسیختگی



(الف) شکل گیری سازوکار گسیختگی از زیر پایین ترین لایه ژئوسل

شکل ۸. سازوکار گسیختگی شیروانی مسلح شده با ژئوسل برای فاصله مسلح کننده ۷۵ میلی متر

۴. نتیجه گیری

بین مسلح کننده‌ها، ظرفیت باربری پی مستقر بر بالای شیروانی مسلح نسبت به فاصله کمتر ژئوسل‌ها از یکدیگر، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به نوع گسیختگی شیروانی خاکی نسبت داد. زمانی که فاصله بین ژئوسل‌ها افزایش می‌یابد جابجایی قائم و افقی در محدوده بین دو مسلح کننده تقریباً مشابه حالت غیرمسلح است و احتمال شکل‌گیری گسیختگی برشی در این ناحیه وجود دارد.

- ظرفیت باربری پی واقع در عمق نسبت به پی واقع در سطح بیشتر بوده، اما کارایی ژئوسل برای پی‌های واقع در سطح بیشتر می‌باشد. دلیل افزایش میزان ظرفیت باربری پی سطحی کارگذاری شده در عمق را می‌توان به تغییر ناحیه مقاوم گسیختگی زیر پی با تغییر در عمق کارگذاری پی نسبت داد. با افزایش عمق کارگذاری پی، ناحیه مقاوم گسیختگی زیر پی بزرگتر شده و در نتیجه پی، ظرفیت باربری بیشتری را تجربه خواهد نمود. اگرچه، کاهش کارایی ژئوسل برای پی کارگذاری شده در عمق نسبت به پی واقع بر سطح را می‌توان به تفاوت در مقدار طول ادامه یافته ژئوسل از گوشه سمت راست پی در این دو حالت نسبت داد.

- افزایش طول ژئوسل و به تبع آن افزایش طول ادامه یافته ژئوسل از گوشه سمت راست پی در شیروانی‌های با شیب زیاد، باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری پی خواهد شد. دلیل این افزایش را می‌توان به بسیج شدن کرنش در ژئوسل در ناحیه گسیختگی سمت راست پی (لبه دور از تاج شیروانی) نسبت داد.

- وجود ژئوسل در شیروانی خاکی، باعث افزایش ظرفیت باربری پی شده و سازوکارهای گسیختگی متفاوتی در شیروانی‌های مسلح نسبت به شیروانی‌های غیرمسلح ایجاد خواهد شد. با توجه به

این تحقیق، به بررسی تأثیر استفاده از ژئوسل در رفتار پی سطحی واقع بر شیروانی خاکی پرداخته است. شیروانی خاکی با ارتفاع ۸۰۰ mm و زاویه شیب ۷۰° به همراه پی سطحی با پهنای ۳۰۰ mm مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس (با ضریب مقیاس 1/10) ارائه شده است:

- به منظور افزایش ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر شیروانی خاکی با شیب زیاد و نزدیک به لبه شیب، تعداد حداقلی برای لایه‌های ژئوسل مورد نیاز است. در صورت عدم وجود لایه‌های کافی ژئوسل، ظرفیت باربری نهایی شیروانی مسلح تغییری نسبت به حالت غیرمسلح نخواهد داشت. پارامترهایی از قبیل زاویه شیب شیروانی، نوع خاک شیروانی و فاصله پی از لبه شیروانی تأثیرگذار هستند. در شرایط آزمایش‌های این تحقیق، حداقل سه لایه ژئوسل برای تغییر در مقدار ظرفیت باربری پی نیاز است. در صورت وجود لایه‌های کافی، ظرفیت باربری پی افزایش یافته و سختی شیروانی نیز افزایش می‌یابد. در این شرایط، پی و شیروانی دوران و جابجایی نسبتاً کمتری را نسبت به حالت غیرمسلح تجربه خواهند نمود. افزایش در مقدار ظرفیت باربری پی با افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل را می‌توان به سازوکار مسلح‌کنندگی ناشی از افزایش مقاومت در بخش مقاوم زیر پی، قفل و بست بین خاک و ژئوسل، محصورکنندگی خاک توسط ژئوسل و عملکرد غشایی ژئوسل نسبت داد.

- با افزایش فاصله بین ژئوسل‌ها برای شیروانی مسلح با سه لایه ژئوسل، همچنان افزایش ظرفیت باربری پی نسبت به حالت شیروانی غیرمسلح مشاهده می‌شود. با این حال، زمانی که فاصله بین ژئوسل‌ها افزایش می‌یابد، سختی مجموعه شیروانی مسلح کاهش می‌یابد و شیروانی جابجایی‌های افقی و قائم بیشتری را تجربه می‌کند. همچنین، با افزایش فاصله

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مطابق پژوهانه به شماره BNUT/395032/00 و همچنین حمایت مالی مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران قدردانی می‌نمایند.

رفتار غشایی و بیرون‌کشیدگی ژئوسل، بار وارده از پی به اعماق بیشتر منتقل شده و ژئوسل شبیه یک پی با ابعاد بزرگتر عمل می‌کند. در این شرایط، رفتار بار-نشست و سازوکار گسیختگی شیروانی‌های مسلح با چیدمان مختلف ژئوسل، به طور قابل توجهی در سازوکارهای گسیختگی تأثیرگذار است.

۶. مراجع

- Alamshahi, S. and Hataf, N. 2009. "Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and grid-anchor". *Geotext. Geomembranes*, 27(3): 217-226.
- ASTM. 2011. "Standard test method for tensile properties of geotextiles by the wide-width strip method". ASTM International.
- Berg, R. R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. 2009. "Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes". Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
- Borthakur, B., Nambiar, M., Biswas, A. and Kalitha, U. 1988. "Studies on the bearing capacity of strip footing on slopes". *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, Bombay*.
- Chen, R. and Chiu, Y. 2008. "Model tests of geocell retaining structures". *Geotext. Geomembranes*, 26(1): 56-70.
- Choudhary, A., Jha, J. and Gill, K. 2010. "Laboratory investigation of bearing capacity behaviour of strip footing on reinforced flyash slope". *Geotext. Geomembranes*, 28(4): 393-402.
- Dash, S. K., Rajagopal, K. and Krishnaswamy, N. 2007. "Behaviour of geocell-reinforced sand beds under strip loading". *Can. Geotech. J.*, 44(7): 905-916.
- El Sawwaf, M. A. 2007. "Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope". *Geotext. Geomembranes*, 25(1): 50-60.
- Fahlani, H. K., Arvin, M. R., Hataf, N. and Khademhosseini, A. 2021. "Experimental model studies on strip footings resting on geocell-reinforced sand slopes". *Int. J. Geosynth. Ground Eng.*, 7(2): 1-15.
- Huang, C. C., Tatsuoka, F. and Sato, Y. 1994. "Failure mechanisms of reinforced sand slopes loaded with a footing". *Soils Found.*, 34(2): 27-40.
- Javankhoshdel, S. and Bathurst, R. J. 2016. "Influence of cross correlation between soil parameters on probability of failure of simple cohesive and $c-\phi$ slopes". *Can. Geotech. J.*, 53(5): 839-853.
- Kazemian, T. and Arvin, M. R. 2019. "Three-dimensional stability of locally loaded geocell-reinforced slopes by strength reduction method". *Geomech. Geoen.*, 14(3): 185-201.
- Mehdipour, I., Ghazavi, M. and Moayed, R. Z. 2013. "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect". *Geotext. Geomembranes*, 37: 23-34.
- Mehrjardi, G. T., Ghanbari, A. and Mehdizadeh, H. 2016. "Experimental study on the behaviour of geogrid-reinforced slopes with respect to aggregate size". *Geotext. Geomembranes*, 44(6): 862-871.
- Selvadurai, A. and Gnanendran, C. 1989. "An experimental study of a footing located on a sloped fill: influence of a soil reinforcement layer". *Can. Geotech. J.*, 26(3): 467-473.
- Viswanadham, B. and König, D. 2004. "Studies on scaling and instrumentation of a geogrid". *Geotext. Geomembranes*, 22(5): 307-328.
- Yoo, C. 2001. "Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope". *Geotext. Geomembranes*, 19(5): 279-298.