

مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی اثر مهار برگشتی در ظرفیت باربری پی منفرد روی خاک مسلح

احمد اوزبا * (دانشیار)

حمید صادق پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۱/۴، ص. ۹۳-۱۰۴ (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، اثر ایجاد مهار برگشتی در انتهای مسلح‌کننده‌ها در افزایش ظرفیت باربری پی منفرد واقع بر ماسه‌ی مسلح شده با الیاف پلیمری بررسی شده است. ماسه‌ی بستر پی درون یک جعبه‌ی فولادی به ابعاد $100 \times 100 \times 70$ سانتی‌متر و پی نیز با استفاده از یک صفحه‌ی فولادی به ابعاد $20 \times 20 \times 2/5$ سانتی‌متر شبیه‌سازی شده است. برای مدل‌سازی مکانیسم اثر مهار برگشتی در ظرفیت باربری پی، از نرم‌افزار ۳D FLAC استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورتی که طول برگشت مهار به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد و انتهای مهار در زیر پی قرار گیرد، ظرفیت باربری پی مسلح شده با مهار برگشتی افزایش در مقایسه با حالتی که مسلح‌کننده‌های بدون مهار با طول برابر استفاده شده است، حدود ۲۷٪ خواهد داشت. ایجاد مهار برگشتی باعث افزایش محصورشدگی در خاک زیر پی می‌شود و با افزایش طول آن، تنش همسان در زیر پی، توزیع یکنواخت‌تری خواهد داشت.

واژگان کلیدی: پی منفرد، خاک مسلح، الیاف پلیمری کرین، مهار برگشتی، ظرفیت باربری.

aouria@uma.ac.ir
sadehpourhamid1042@gmail.com

۱. مقدمه

با پیشرفت سریع ساخت و سازها و محدودیت‌های مربوط به انتخاب زمین مناسب برای اجرای پروژه‌های عمرانی، ساخت و ساز بر روی زمین‌هایی با مشخصات مکانیکی ضعیف اجتناب‌ناپذیر شده است. روش‌های مختلفی برای تقویت و بهبود مشخصات مقاومتی خاک‌ها وجود دارد، که روش‌های تثبیت مکانیکی و یا تسلیح خاک از جمله روش‌های مذکور هستند. با توجه به این‌که مقاومت برشی خاک به عنوان نوعی مصالح دانه‌ی پی به وسیله‌ی تنش محصورکننده تأمین می‌شود، در روش‌های تسلیح خاک، استفاده از المان‌های سازه‌ی مسلح‌کننده، مانند: ژئوتکستایل^۱، ژئوگرید^۲ و یا ژئوسل^۳، که عموماً المان‌های کششی هستند، محصورشدگی توده‌ی خاک را افزایش می‌دهد و مقاومت برشی آن را بیشتر می‌کند.^[۱ و ۲]

در نیم قرن گذشته، استفاده از خاک مسلح به صورت روزافزون توسعه یافته است. از روش‌های تسلیح خاک برای پایداری شیب‌ها و خاکریزها، دیوارهای نگهدارنده، حفاظت دامنه‌های شیب‌دار و افزایش ظرفیت باربری پی‌ها استفاده می‌شود. معمولاً گسیختگی خاک مسلح در اثر گسیختگی برشی توده‌ی خاک، گسیختگی کششی مسلح‌کننده و یا لغزش نسبی بین مسلح‌کننده و خاک صورت می‌گیرد. ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک مسلح علاوه بر مشخصات مکانیکی خاک، به نوع

و مشخصات مکانیکی مسلح‌کننده‌ها، عمق قرارگیری، تعداد و فواصل میان لایه‌ها، طول لایه‌ها و همچنین نحوه‌ی چیدمان آنها بستگی دارد.^[۳] عمق بهینه‌ی قرارگیری مسلح‌کننده‌ها در حدود ۳۳/۰ تا ۲۵/۱ برابر عرض پی گزارش شده است و قرارگیری مسلح‌کننده در موقعیت‌های خارج از محدوده‌ی اخیر، افزایش چندانی در ظرفیت باربری پی نشان نمی‌دهد.^[۴] افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده تا حد معینی باعث افزایش ظرفیت باربری پی می‌شود، ولی افزایش بیشتر آنها، تأثیر چندانی در افزایش ظرفیت باربری پی نخواهد داشت.^[۵ و ۶] مقادیر مختلفی بین ۱۲ تا ۵۰ درصد برای افزایش ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح شده با ۲ لایه‌ی مسلح‌کننده نسبت به ظرفیت باربری پی مشابه روی خاک مشابه با مسلح شده‌ی یک لایه‌ی مسلح‌کننده گزارش شده است.^[۷ و ۸] این اختلاف ممکن است ناشی از مشخصات مصالح یا نوع مسلح‌کننده‌ی استفاده شده باشد. همانند تعداد لایه‌ها، افزایش طول مسلح‌کننده‌ها نیز تا اندازه‌ی می‌تواند باعث افزایش ظرفیت باربری پی شود. طول بهینه‌ی مسلح‌کننده‌های صفحه‌ی حدود ۳ تا ۶ برابر عرض پی گزارش شده است.^[۸]

توجه به مسائل زیست‌محیطی، استفاده‌ی بهینه از منابع و اجرای پروژه‌ی ساختمانی با کمینه‌ی دست‌خوردگی در طبیعت از مباحث مهم در روش‌های ساخت و ساز جدید است. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بیشترین افزایش ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح به نسبت مصالح استفاده شده در حالتی رخ می‌دهد که فقط از یک لایه‌ی مسلح‌کننده در عمق مناسب استفاده

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۱۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۳/۲۲، پذیرش ۱۴۰۰/۵/۳۱.

DOI:10.24200/J30.2021.57629.2922

شود.^[۳] با توجه به مدهای محتمل گسیختگی در خاک مسلح، با فرض استفاده از مسلح‌کننده‌ی پر مقاومت، ایجاد مهار کافی برای مسلح‌کننده می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای افزایش ظرفیت باربری پی واقع بر خاک مسلح بدون افزایش تعداد و طول نوارهای مسلح‌کننده باشد. استفاده از روش‌های مناسب برای کاهش طول مهار مورد نیاز برای مسلح‌کننده‌ها، تأثیر به سزایی در افزایش کاربرد خاک مسلح و کاهش هزینه‌های اجرای آن در پی خواهد داشت. کاهش طول مهار مسلح‌کننده‌ها با افزایش ظرفیت بیرون‌کشیدگی آنها از داخل خاک امکان‌پذیر است. روش‌های تثبیت شیمیایی و مهار مکانیکی برای افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی و کاهش طول مهار ارائه شده است. توفیق و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵)،^[۹ و ۱۰] استفاده از رزین را برای تقویت مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده‌ی الیاف کربنی از خاک توصیه کرده‌اند. اوریا و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۱ و ۱۲] نیز استفاده از روش تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده برای افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده و کاهش طول مهار آن توصیه کرده‌اند. نتایج مطالعات ایشان نشان داده است که تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک مسلح‌کننده می‌تواند مقاومت بیرون‌کشیدگی را تا حدود ۴۰٪ افزایش دهد. همچنین اوریا و محمودی (۲۰۱۸)،^[۱۳] ظرفیت باربری پی نواری روی خاک مسلح با فصل مشترک سیمانی شده را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند که تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده می‌تواند باعث کاهش طول مهار مسلح‌کننده تا حدود ۴۰٪ شود.

لاجوردی و همکاران (۲۰۱۴)،^[۱۴] پارامترهای هندسی مهار برگشتی برای افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی و کاهش طول مهار مسلح‌کننده‌ها را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده و دریافته‌اند که تأثیر مهار برگشتی در افزایش ظرفیت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده در تنش‌های محدودکننده‌ی بالا، نمایان تر است. همچنین برای مشاهده‌ی اثر مهار برگشتی در افزایش ظرفیت، جابه‌جایی بیشتری در مقایسه با حالت معمولی مورد نیاز است. نتایج مطالعات عددی به روش المان‌های مجزا و آزمایشگاهی روی تأثیر مهار برگشتی در ظرفیت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده از داخل خاک نشان می‌دهد که ایجاد مهار برگشتی تأثیر به سزایی در افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده از خاک داشته است. ولی طول برگشت مهار، تأثیر بیشینه‌ی حدود ۸٪ در افزایش بیشتر مقاومت بیرون‌کشیدگی داشته است.^[۱۵] ژو^۴ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۶] نیز در مطالعه‌ی تأثیر زاویه‌ی برگشت مهار برگشتی در مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده نتیجه گرفتند که با تندتر شدن زاویه‌ی قسمت پایین برگشت مهار، افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی در جابه‌جایی‌های کوچک‌تر رخ می‌دهد. کازی^۵ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۷] رفتار نواری روی خاک مسلح با مسلح‌کننده‌های مهار شده را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند که ایجاد مهار برگشتی در صورتی در ظرفیت باربری پی تأثیرگذار است که خاک زیر پی تا حدود زیادی متراکم شده باشد. مهار برگشتی باعث افزایش مدول بستر خاک زیر پی می‌شود. همچنین آریا^۶ و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۸] تأثیر ایجاد مهار برگشتی در مسلح‌کننده‌ها را در افزایش ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح به صورت عددی مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش طول مهار برگشتی، ظرفیت باربری پی نیز افزایش می‌یابد. رجا^۷ و شوکلا^۸ (۲۰۲۰)،^[۱۹] روشی تحلیلی بر اساس تئوری حالت حدی برای تعیین ظرفیت باربری پی نواری روی خاک مسلح با مسلح‌کننده‌های مهار ارائه کرده‌اند، که در آن وجود مهار برگشتی در مسلح‌کننده‌ها به صورت افزایش تنش محصورکننده‌ی جانبی در خاک زیر پی اعمال شده است.

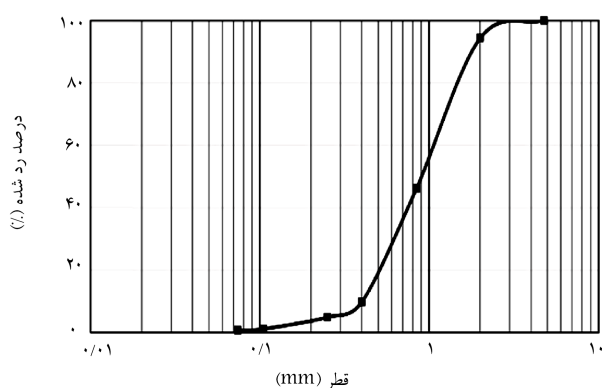
در پژوهش حاضر، اثر مهار برگشتی در افزایش ظرفیت باربری پی منفرد به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. با توجه به این‌که ایجاد مهار برگشتی می‌تواند مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده را افزایش دهد، جهت

استفاده‌ی بهینه از اضافه مقاومت ذکر شده و همچنین افزایش محصورشدگی خاک زیر پی، از مسلح‌کننده‌های الیاف کربنی که سختی و مقاومت کششی بسیار بالا دارند، استفاده شده است. جهت صرفه‌جویی در مصالح مسلح‌کننده به جای مسلح‌کننده‌های پیوسته از نوارهای منقطع مسلح‌کننده استفاده شده است، که باعث ایجاد شرایط تنش پیچیده در زیر پی شده است. در بیشتر مطالعات پیشین، از مسلح‌کننده‌های صفحه‌ی پیوسته برای تسلیح خاک در زیر پی نواری استفاده شده است. همچنین جهت بررسی مکانیسم اثر مهار برگشتی در ظرفیت باربری پی، مدل‌سازی عددی انجام شده است. بعد از صحت‌سنجی مدل عددی و تطابق آن با داده‌های آزمایشگاهی، از آن برای مطالعات تکمیلی استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. ماسه

ماسه‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر، طبق طبقه‌بندی سیستم متحد، ماسه‌ی بدانه‌بندی شده (SP) بوده است،^[۲۰] که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مشخصات ماسه‌ی استفاده شده نیز، که براساس استانداردهای ASTM تعیین شده است، در جدول ۱ ارائه شده است.^[۲۱-۲۳] ضریب یکنواختی و ضریب انحنای نمودار دانه‌بندی به ترتیب برابر ۳ و ۷۴/۰ بوده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی استفاده شده.

کمیت	واحد	مقدار
رطوبت	درصد	۲
وزن مخصوص کمینه‌ی خشک	کیلو نیوتن بر مترمکعب	۱۵/۶
وزن مخصوص بیشینه‌ی خشک	کیلو نیوتن بر مترمکعب	۱۷/۵
وزن مخصوص	کیلو نیوتن بر مترمکعب	۱۶/۸
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	درجه	۳۷
زاویه‌ی اتساع	درجه	۷
زاویه‌ی اصطکاک ظاهری	درجه	۳۰
مدول ارتجاعی	مگاپاسکال	۱۵
مدول برشی	مگاپاسکال	۶

۲.۲. مسلح کننده

با توجه به این که ایجاد مهار برگشتی باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده می شود، لذا می توان از مسلح کننده های پرمقاومت نیز برای تسلیح خاک استفاده کرد. در پژوهش حاضر، از ورقه های الیاف پلیمری کربن از نوع الیاف کربنی یک طرفه برای تسلیح خاک استفاده شده است؛ که در جهت طولی الیاف کربنی قرار گرفته و در جهت عرضی فقط چند رشته ی کم مقاومت جهت نگهداری الیاف طولی در محل خود بوده است. پارامترهای مکانیکی مسلح کننده طبق استاندارد ASTM تعیین شده اند. [۲۴] در جدول ۲، مشخصات فیزیکی و مکانیکی مسلح کننده ی استفاده شده ارائه شده است.

۳.۲. مدل سازی فیزیکی

برای مدل سازی آزمایشگاهی پی روی خاک مسلح، یک جعبه ی فلزی به طول و عرض 100×100 سانتی متر و ارتفاع 80 سانتی متر حاوی ماسه به عنوان مدل بستر زمین استفاده شده است. از یک صفحه ی فلزی مربعی به طول و عرض 20×20 سانتی متر مربع و ضخامت $2/5$ سانتی متر جهت مدل سازی پی منفرد و نیز از یک دستگاه جک هیدرولیکی جهت اعمال بار قائم بر سیستم پی و خاک استفاده شده است. برای اندازه گیری مقدار دقیق نیروی اعمال شده از یک لودسل دیجیتالی 10 تنی و برای اندازه گیری مقدار دقیق نشست پی، که متناظر با نیروی اعمال شده است، نیز از یک خط کش مقاومتی استفاده شده است. بار اعمال شده به همراه میزان نشست پی متناظر با آن به دیتالاگر منتقل و ذخیره می شد. با توجه به مکانیسم دستی جک بارگذاری، در کلیه ی آزمایش ها سعی شد که تعداد سیکل های رفت و برگشت بارگذاری جک به صورت یک دوره در ثانیه باشد، که تقریباً نرخ بارگذاری نشست کنترل آن حدود 1 میلی متر بر دقیقه بوده است. در شکل ۲، مدل

جدول ۲. مشخصات مسلح کننده ی استفاده شده.

مقدار	واحد	کمیت
65°	کیلوگرم بر مترمربع	جرم واحد سطح
۴۵	گیگاپاسکال	مدول ارتجاعی
۴۲۷	مگاپاسکال	مقاومت کششی
75%		کرنش طولی نظیر گسیختگی
34°		نسبت پواسون
۱	میلی متر	ضخامت

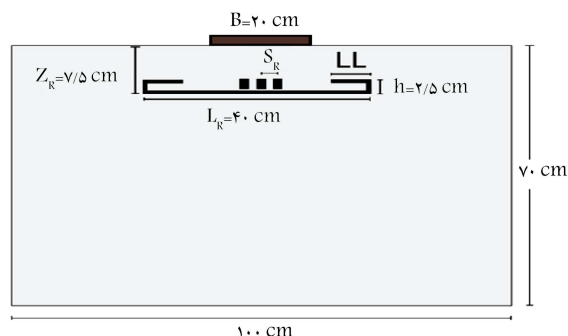


شکل ۲. مدل فیزیکی پی روی خاک مسلح.

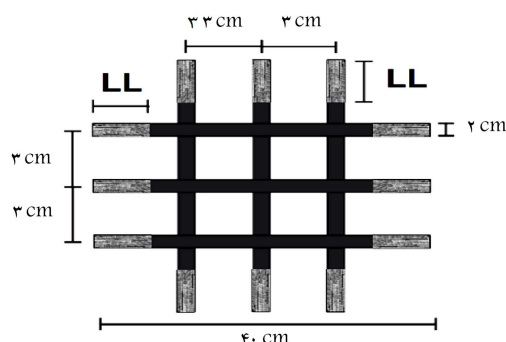
۴.۲. برنامه ی آزمایش و آماده سازی مدل ها

جهت بررسی اثر مهار برگشتی در ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح، ۳ سری آزمایش انجام شده است. ابتدا آزمایش هایی روی خاک غیرمسلح انجام شد تا ظرفیت باربری پی روی خاک غیرمسلح تعیین شود. سپس ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح شده با مسلح کننده های بدون مهار تعیین شد. طول و عمق قرارگیری مسلح کننده ها با توجه به نتایج مطالعات پیشین، [۲۵] تعیین شد. جهت ایجاد امکان مقایسه ی اثر مهار برگشتی در ظرفیت باربری پی، طول مسلح کننده های مهار نشده به گونه یی انتخاب شد که در چند مدل، طول کلی مسلح کننده های آزاد و مهار شده برابر باشند، که بتوان ظرفیت باربری پی هایی که با یک طول برابر مسلح کننده در دو حالت مهار شده و آزاد را مقایسه کرد. طول مسلح کننده های آزاد، 10 ، 20 ، 30 ، 40 ، 50 و 60 سانتی متر در نظر گرفته شد. طول لایه ی پایین مسلح کننده های برگشتی (L_R) 40 سانتی متر یا 2 برابر عرض پی در نظر گرفته شد. طول مهار برگشتی مسلح کننده ها (L_L) شامل 8 طول مختلف از $2/5$ تا 20 سانتی متر با افزایش های $2/5$ سانتی متری در نظر گرفته شد. از 6 نوار مسلح کننده با عرض های 2 سانتی متری، که در جهت عمود بر هم برای مسلح کردن خاک استفاده شد. فاصله ی مرکز به مرکز نوارهای مسلح کننده نیز 3 سانتی متر بوده است. در شکل ۳، نحوه ی قرارگیری مسلح کننده ها در داخل خاک مشاهده می شود.

برای تهیه ی مدل های مشابه قابل مقایسه، وزن مخصوص خاک داخل مخزن به عنوان معیار کنترل در نظر گرفته شده است. در هر آزمایش حدود 1176 کیلوگرم خاک استفاده شده است. جایگذاری ماسه درون جعبه به صورت بارشی بوده است، که باعث ایجاد تخلخل و وزن مخصوص اولیه ی یکسان در تمامی نمونه ها شده است.

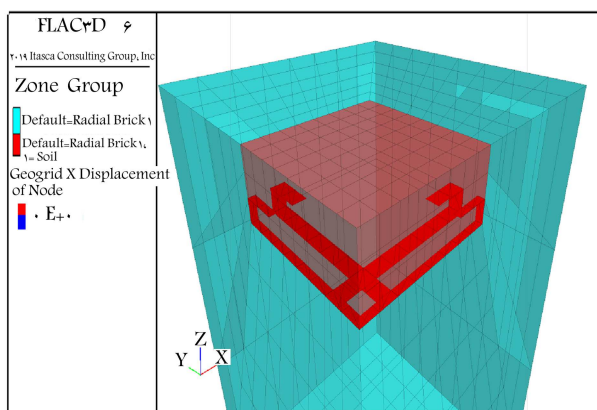


الف) برش قائم مدل فیزیکی؛



ب) پلان قرارگیری مسلح کننده ها.

شکل ۳. چینش مسلح کننده ها در داخل خاک.



شکل ۵. مدل عددی نظیر مدل فیزیکی در نرم افزار ۳D FLAC.

تنش در زیر پی قرار می‌گیرند، دارای نسبت ابعاد بین ۱ تا ۱/۱ هستند. تعداد کل ناحیه‌ها در شبکه‌بندی ذکر شده، ۱۳۱۲ بوده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نواحی مربوط به خاک و المان‌های سازه‌یی به ترتیب مطابق جدول‌های ۱ و ۲ در مدل عددی تعریف شده است. طول المان‌های ژئوگرید منطبق بر شبکه و عرض آنها مطابق شکل ۳، با ۱ و ۲ ردیف المان تعریف شده است. سختی فصل مشترک ژئوگرید و خاک برابر سختی خود ژئوگرید تعریف شده است. با توجه به روش عملکرد نرم‌افزار، شرایط مرزی با اعمال سرعت شبیه‌سازی شده است. برای تمامی گره‌های واقع بر ۴ وجه جانبی و کف مدل، سرعت عمود بر بردار نرمال صفحه‌ی صفر تعریف شده است. در ناحیه‌ی مربع‌شکل به ابعاد 10×10 سانتی‌متر سرعتی برابر ۱ میلی‌متر بر دقیقه، که معادل همان سرعت بارگذاری مدل فیزیکی بود، اعمال شد. در شکل ۵، نمایی از مدل عددی مشاهده می‌شود. قابل توجه است که ضریب ارتجاعی تعریف شده برای مدل عددی با روش آنالیز برگشتی تعیین شده است.

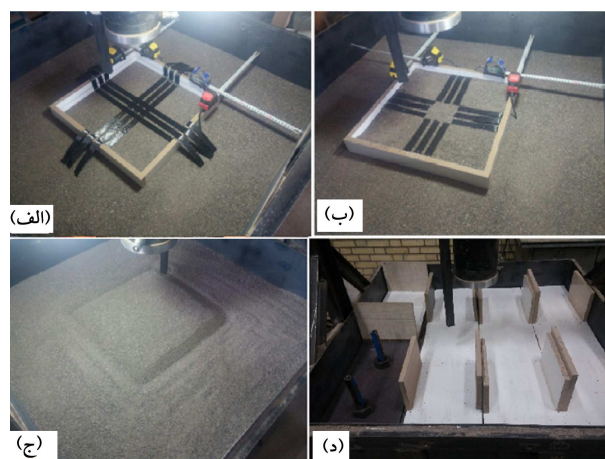
۶.۲. آنالیز ابعادی

مهم‌ترین بخش کار در مدل‌سازی‌های فیزیکی، تحلیل ابعادی مدل فیزیکی است. [۲۶] با توجه به قضیه‌ی پی - بوکینگهام، اگر در یک مدل فیزیکی تعداد m متغیر تأثیر داشته باشند که از نظر ابعادی n بُعد داشته باشند، کلیه‌ی متغیرهای حاکم بر آن مدل را می‌توان در $(m-n)$ متغیر بدون بُعد خلاصه کرد. بنابراین پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری پی منفرد روی ماسه‌ی مسلح را می‌توان به صورت پارامتر بدون بُعد باربری مطابق رابطه‌ی ۱ بیان کرد: [۲۷]

$$q_u/B\gamma = f(\phi, \delta, D/B, T/B\gamma, a/B, Z_R/B, L_R/B, L_L/B) \quad (1)$$

که در آن، q_u ظرفیت باربری پی، ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، B عرض پی، D عمق مدفون پی، γ وزن مخصوص خاک، T مقاومت کششی مسلح‌کننده، a عرض مقطع مسلح‌کننده، Z_R فاصله‌ی مسلح‌کننده از زیر پی، δ زاویه‌ی اصطکاک ظاهری بین خاک و مسلح‌کننده، L_R طول مسلح‌کننده و L_L طول مهار برگشتی مسلح‌کننده است. علاوه بر سازگاری ابعادی، آثار سطح تنش در رفتار مکانیکی خاک نیز در تعمیم نتایج مدل به مقیاس واقعی تأثیرگذار است.

التابی^۹ و فلنوس^{۱۰} (۱۹۹۴)، [۲۸] با در نظر گرفتن این نکته که نسبت تخلخل خاک وابسته به سطح تنش و مؤثر در رفتار تنش - کرنش و گسیختگی خاک است، روشی برای تعمیم نتایج مدل‌های فیزیکی کوچک‌مقیاس به نتایج مقیاس بزرگ ارائه کرده‌اند. در روش ذکر شده، نسبت تخلخل نهایی خاک پس از گسیختگی کامل در

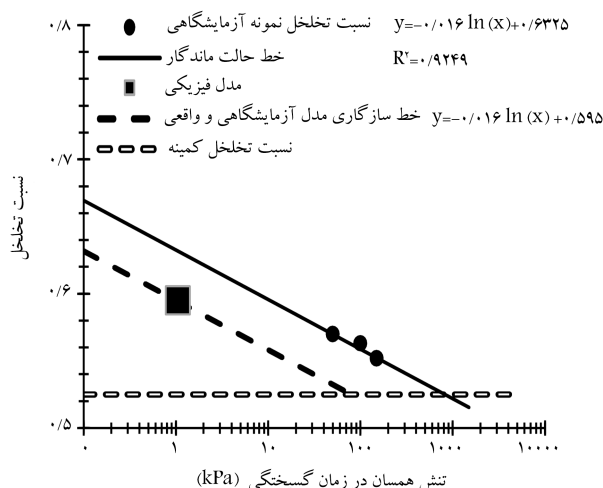


شکل ۴. مراحل آماده‌سازی مدل فیزیکی.

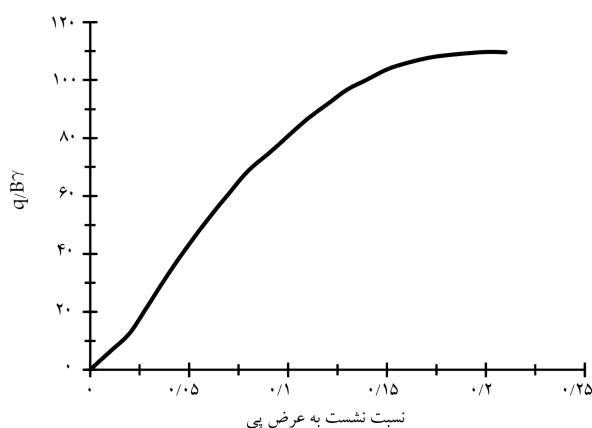
برای مدل اولیه‌ی غیرمسلح، ماسه در ۷ لایه ۱۰ سانتی‌متری در داخل جعبه قرار گرفت. در مرحله‌ی اول، بدون ایجاد فشار اضافی ماسه در داخل جعبه‌ی تسطیح و توسط وزنه‌ی مربعی شکل به وزن ۱۲ کیلوگرم و به ابعاد 25×20 سانتی‌متر از ارتفاع ۱۲ سانتی‌متری با ۸ بار سقوط در ۶ موقعیت متفاوت متراکم شد. برای جلوگیری از ایجاد تراکم غیریکنواخت، از الگوی تراکم استفاده شد. در نمونه‌های مسلح شده، جهت امکان قرار دادن مسلح‌کننده‌ها، ارتفاع لایه‌ی آخر ماسه ۷/۵ و لایه‌ی دوم نیز ۱۲/۵ سانتی‌متر بوده است. در شکل ۴ (الف، ب و ج)، جایگذاری مسلح‌کننده‌های مهار و در شکل ۴ - د، روش متراکم کردن مدل مشاهده می‌شود.

۵.۲. مدل‌سازی عددی

به منظور بررسی چگونگی عملکرد مهار برگشتی و مکانیسم تأثیر آن در ظرفیت باربری پی از مدل‌سازی عددی استفاده شده است. برای مدل‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی از نرم‌افزار تحلیل عددی ۳D FLAC استفاده شد، که بر اساس روش تفاضلات محدود با انتگرال‌گیری صریح از معادلات تعادل دینامیکی عمل می‌کند. برای مدل‌سازی خاک از مدل رفتاری موهر - کولمب در نواحی سه‌بعدی و برای مدل‌سازی مسلح‌کننده‌ها از المان‌های سازه‌یی ژئوگرید استفاده شده است. جهت سهولت محاسبات، فقط ۲ مدل فیزیکی با روش عددی شبیه‌سازی و برای تعیین ابعاد بهینه‌ی شبکه از آنالیز حساسیت استفاده شد. گرچه در بسیاری از موارد در آنالیزهای عددی، شبکه‌ی ریزتر نتایج دقیق‌تری می‌دهد، ولی در آنالیزهایی با تغییرشکل‌های بزرگ مشابه مدل حاضر، استفاده از المان‌های بسیار ریز باعث ایجاد تغییرشکل‌های نسبی غیرقابل قبول در بعضی المان‌ها به خصوص در المان‌های واقع در گوشه‌های پی (محل تمرکز تنش و گسیختگی موضعی) می‌شود. با انجام آنالیزهای متعدد، ابعاد شبکه به گونه‌یی تعیین شد تا وقوع نشست حدود ۳/۰ درصد پی، تغییرشکل نسبی غیرقابل قبول در المان‌های گوشه‌ی پی در مدل مسلح ایجاد نشود و نمودار تنش - نشست از نمودار تنش - نشست ریزترین شبکه‌ی قابل قبول بیشتر از ۱٪ اختلاف نداشته باشد. ابعاد مدل عددی دقیقاً برابر ابعاد مدل آزمایشگاهی بوده است. شبکه‌بندی در ناحیه‌یی به اندازه‌ی ۲ برابر عرض پی و تا طول و عمق قرارگیری مسلح‌کننده به صورت منظم و با ابعاد $2/5 \times 2/5 \times 2/5$ سانتی‌متری (طول، عرض و ارتفاع) انجام شده است. با دور شدن از ناحیه‌ی مذکور، ابعاد المان‌ها با نسبت ۱/۱ بزرگ‌تر شده و در مجاورت دیواره‌های مدل به ۳ ردیف المان در جهت قائم کاهش یافته است. با روش مذکور، کلیه‌ی المان‌هایی که در ناحیه‌ی گسترش



شکل ۶. محدودی اعتبار تعمیم نتایج مدل در فضای تنش - تخلخل.



شکل ۷. نمودار بارگذاری - نشست مدل غیرمسلح.

۱۰۰ کیلوپاسکال می‌تواند ناشی از وزن ۵/۷ متر ماسه مشابه باشد، که در عمق ۳۱/۰ عرض یک پی گسترده یا منفرد به عرض ۱۸/۴ متر بوده است. در نتیجه می‌توان نتایج مدل آزمایشگاهی حاضر را به نتایج یک پی گسترده یا منفرد واقعی با ابعاد بیشینه ۹۲ برابر مدل آزمایشگاهی تعمیم داد.

۳. نتایج

آزمایش‌ها در ۳ شرایط مختلف، مدل‌های: غیرمسلح، مسلح شده با مسلح‌کننده با انتهای آزاد و در نهایت مدل مسلح شده با مسلح‌کننده‌هایی که انتهای آنها به صورت برگشتی در داخل خاک مهار شده بود، انجام شد. آزمایش‌های انجام شده روی هر مدل، دست‌کم ۳ بار تکرار و میانگین نتایج ۳ آزمایش به عنوان نتیجه نهایی برای آن مدل در نظر گرفته شده است.

۳.۱. نتایج مدل فیزیکی

در شکل ۷، نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مدل فیزیکی غیرمسلح به صورت پارامتر بدون بعد نشان داده شده است. پارامتر بیشینه بدون بعد باربری برای مدل آزمایشگاهی برابر ۱۰۹/۶ (معادل ۳۶۹ کیلوپاسکال) بوده است. خاک زیر پی در

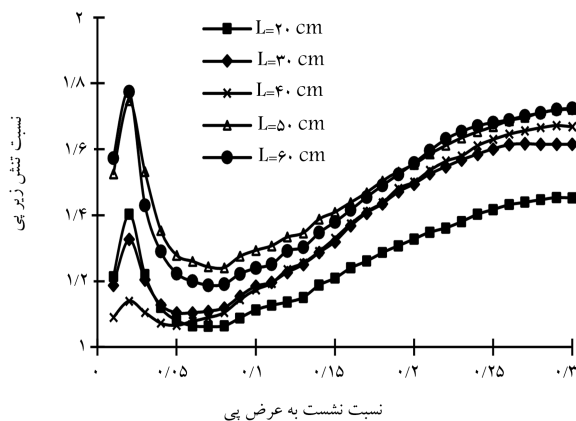
جدول ۳. ضرایب مقیاس برای مدل بر اساس مفهوم حالت ماندگار. [۲۸]

مقیاس مدل	مقیاس واقعی	کمیت
n	۱	طول
n ^۱	۱	سطح
n ^۳	۱	حجم
۱	۱	شتاب
n	۱	تنش
۱	۱	کرنش
n	۱	جابه‌جایی
n ^۲	۱	نیرو
$e_m = e_p + \lambda \ln(n)$	e_p	نسبت تخلخل

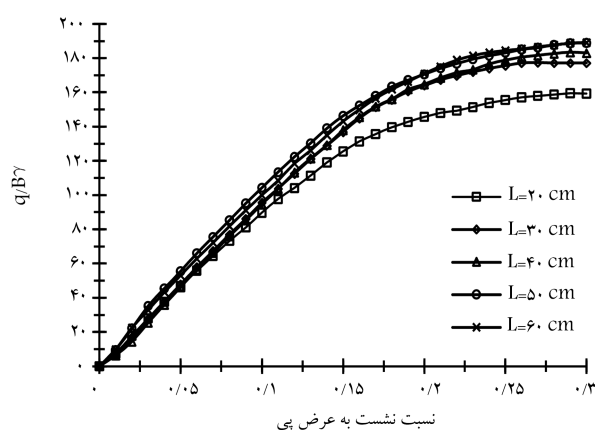
۳ آزمایش مقاومت برشی در ۳ سطح تنش مختلف تعیین می‌شود و با استفاده از نتایج مذکور، منحنی تخلخل - تنش در شرایط پس از گسیختگی برای ماسه رسم می‌شود. برای تمام ماسه‌ها، منحنی اخیر در مقیاس نیمه‌لگاریتمی تقریباً به صورت خطی و برای هر ماسه منحصر به فرد است؛ و در واقع نظیر منحنی حالت بحرانی در رس است که در مورد ماسه، منحنی حالت ماندگار [۲۹، ۳۰] و اختلاف تخلخل خاک از منحنی حالت ماندگار نیز پارامتر اپسیلون نامیده شده است. [۲۸] رفتار مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس را می‌توان با استفاده از منحنی حالت ماندگار و پارامتر اپسیلون به رفتار مدل واقعی با مقیاس بزرگ تعمیم داد. تمامی مدل‌هایی که شرایط تنش - تخلخل اولیه‌ی آنها روی منحنی‌هایی به موازات منحنی حالت ماندگار آن خاک قرار داشته باشند، رفتار مشابهی دارند و می‌توان نتایج به دست آمده از آنها را به یکدیگر تعمیم داد. در جدول ۳، ضرایب تبدیل مقیاس مدل با استفاده از روش التایی و فلنپوس، [۲۸] مشاهده می‌شود، که ضرایب ارائه شده در آن، بعد از اعمال مفهوم حالت ماندگار در آنالیز ابعادی بر اساس قضیه‌ی پی - بوکینگهام استخراج شده‌اند. [۲۸] برای تعمیم نتایج مدل فیزیکی بررسی شده در پژوهش حاضر نیز از روش التایی و فلنپوس استفاده شده است.

در شکل ۶، تخلخل نهایی در سه آزمایش برش در محدوده‌ی تنش ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در فضای نیمه‌لگاریتمی تنش - تخلخل مشاهده می‌شود. خط عبوری از سه نقطه‌ی مذکور، نشان‌گر خط حالت ماندگار است. تنش در محل محصور شده در بین مسلح‌کننده (عمق ۶/۲۵ سانتی‌متری زیر پی یا ۳۱/۰ عرض پی) و تخلخل اولیه‌ی مدل با نقطه‌ی مربع توپر در شکل ۶ نشان داده شده است (۱/۰۵ کیلوپاسکال). نقطه‌ی اشاره شده، به عنوان نقطه‌ی مبنای تنش و تخلخل مدل آزمایشگاهی است و در مدل غیرمسلح در گوه‌ی صلب زیر پی و در مدل‌های مسلح در محل وسط مهار برگشتی قرار دارد. خطی که به موازات خط حالت ماندگار و از نقطه‌ی مبنای تنش - تخلخل مدل عبور می‌کند، رابطه‌ی بین سطح تنش و تخلخل را مشخص می‌کند، که نتایج مدل در آن محدوده معتبر است. خط اشاره شده به صورت خط چین توپر با عنوان خط سازگاری مدل و نمونه‌ی واقعی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

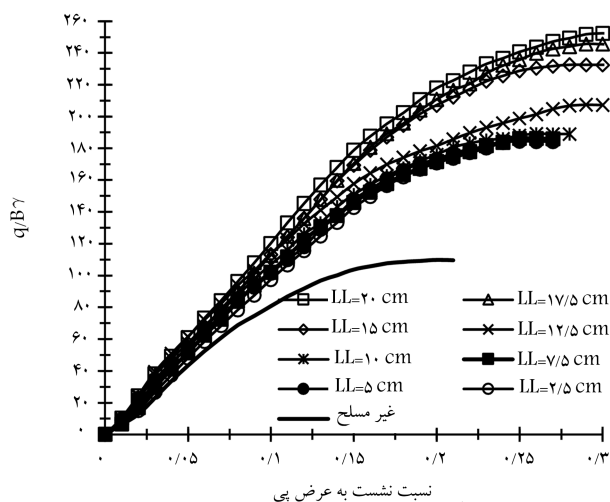
با توجه به مشخصات ماسه‌ی استفاده شده، تخلخل کمیته‌ی آن برابر ۵۲۵/۰ است. با در نظر گرفتن رطوبت ۲٪، وزن مخصوص ماسه در تخلخل کمیته برابر ۱۷/۸۵ کیلوپوتن بر مترمکعب خواهد بود. در منحنی سازگاری مدل و نمونه‌ی واقعی نشان داده شده در شکل ۶، تنش نظیر تخلخل کمیته، که حد بالایی محدوده‌ی اعتبار مدل است، ۱۰۰ کیلوپاسکال در نقطه‌ی مبنای تنش و تخلخل مدل در عمق ۳۱/۰ عرض پی است. با توجه به بیشینه‌ی وزن مخصوص ماسه‌ی استفاده شده، تنش



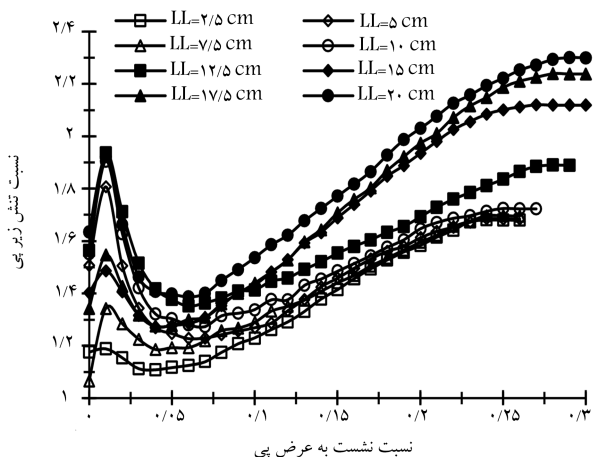
شکل ۹. نسبت افزایش ظرفیت باربری در مدل مسلح بدون مهار به مدل غیرمسلح.



شکل ۸. نمودار بارگذاری - نشست مدل‌های مسلح بدون مهار.



شکل ۱۰. نمودار بارگذاری - نشست مدل‌های مسلح با مهار برگشتی.



شکل ۱۱. نسبت افزایش ظرفیت باربری در مدل مسلح با مهار برگشتی به مدل غیرمسلح.

برای مدل‌هایی که طول مهار برگشتی در آنها از ۱۲/۵ سانتی‌متر بیشتر بوده است، به حدود ۲ میل کرده است، که دلیل آن، درگیری انتهای مهار در داخل منشور توزیع تنش در زیر پی بوده است. مدل‌هایی که در آنها طول مهار برگشتی به اندازه‌ی کافی طولانی بوده و انتهای برگشت مهار در زیر پی قرار گرفته است، به دلیل

حدود نشست‌های بیشتر از ۳ سانتی‌متر کاملاً گسیخته شده و با افزایش نشست، ظرفیت باربری افزایش نیافته است.

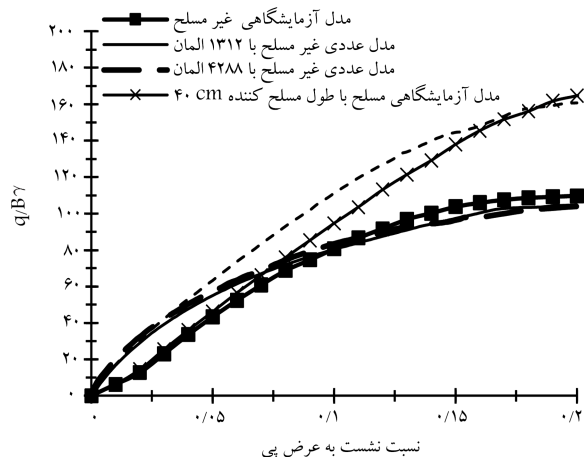
نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مدل مسلح شده با مسلح‌کننده‌های مهار نشده با طول‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ با نسبت‌های طول مسلح‌کننده به عرض پی برابر ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵، ۴/۵ و ۵/۵ مشاهده می‌شود، که مطابق آن ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح افزایش یافته و در نشست‌های زیاد، افزایش ذکر شده‌ی باربری بیشتر مشهود بوده است.

باید این نکته در نظر گرفته شود که عامل تعیین ظرفیت باربری پی از نظر کاربری آن، میزان نشست است. لذا در پژوهش حاضر، ظرفیت باربری نهایی پی روی خاک مسلح نیز مشابه حالت غیرمسلح در نشست ۴۰ میلی‌متر (نسبت نشست به عرض پی مساوی ۵/۲) در نظر گرفته شده است. در شکل ۹، نسبت ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح شده با مسلح‌کننده‌های غیرمهار به ظرفیت باربری پی روی خاک غیرمسلح در نشست‌های متناظر مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۹، استفاده از مسلح‌کننده‌هایی به طول ۱ تا ۳ برابر عرض پی، باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی پی (در نشست ۴۰ میلی‌متر) به ترتیب حدود ۱/۳ تا ۱/۶ برابر شده است. همچنین باید توجه شود که مسلح‌کننده‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، ضریب ارتجاعی بسیار بالا دارند و در نشست‌های کمتر، تأثیر بیشتری نشان می‌دهند.

نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مدل‌هایی که با مسلح‌کننده‌های مهار شده تقویت شده بودند، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند، که مطابق آن، ایجاد مهار باعث افزایش چشمگیر ظرفیت باربری پی در مقایسه با هر دو حالت غیرمسلح و مسلح بدون مهار شده است. مقایسه‌ی شکل‌های ۱۰ و ۸ نشان می‌دهد که برای گسیختگی کامل خاک زیر پی در حالت مهار شده، تغییر شکل‌ها و نشست‌های بیشتری در مقایسه با حالت غیرمسلح و مسلح بدون مهار لازم است.

نسبت ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح شده با مسلح‌کننده‌های دارای مهار برگشتی به ظرفیت باربری پی روی خاک غیرمسلح در نشست‌های متناظر در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، ظرفیت باربری پی هم در نشست‌های کوچک و هم در نشست‌های بزرگ، افزایش چشمگیری داشته است. نکته‌ی خیلی مهم در شکل اخیر، هم‌گرایی نتایج به دو حد مشخص است. نسبت ظرفیت باربری نهایی مدل‌هایی که در آنها طول مهار برگشتی کمتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر بوده است، نسبت به ظرفیت باربری پی روی خاک غیرمسلح به یک مقدار مشخص، که به صورت میانگین حدود ۱/۶۵ بوده است، میل کرده‌اند؛ در حالی که نسبت مذکور



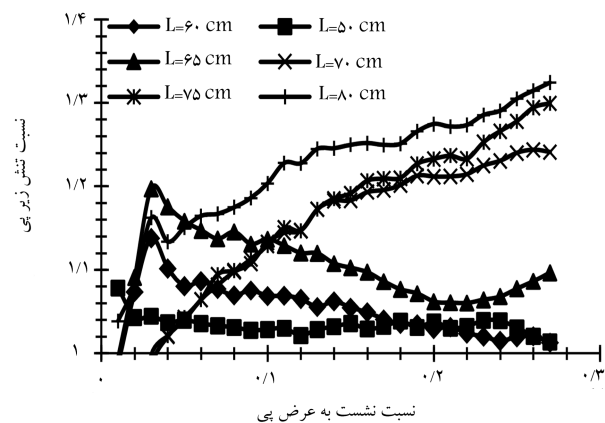
شکل ۱۴. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی برای مدل‌های غیرمسلح و مسلح شده‌ی غیرمهار با طول ۴۰ سانتی‌متر.

باربری همان پی روی ماسه‌ی غیرمسلح به ترتیب برابر ۱/۵۶، ۱/۵۶ و ۱/۵۶ بوده است. در صورتی که با ایجاد مهار برگشتی در انتهای مسلح‌کننده‌ها با طول‌های کلی مشابه، نسبت‌های مذکور برای طول‌های ۵۰، ۶۰ و ۸۰ به ترتیب برابر ۱/۸۹، ۱/۹۸ و ۱/۹۸ بوده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد مهار برگشتی، بسته به طول برگشت مهار، باعث افزایش ۳ تا ۲۷ درصدی ظرفیت باربری در مقایسه با حالت بدون مهار شده است.

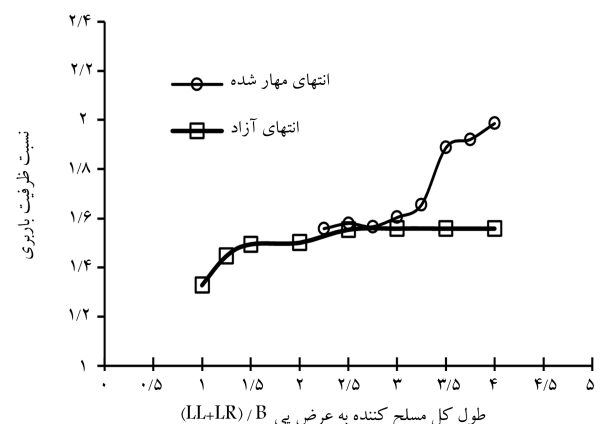
۲.۳. نتایج مدل عددی

در شکل ۱۴، نتایج آنالیزهای عددی مربوط به مدل غیرمسلح و نیز مدل مسلح شده با مسلح‌کننده‌ی غیرمهار با طول ۴۰ سانتی‌متر یا ۲ برابر عرض پی مشاهده می‌شود، که مطابق آن، نتایج مدل عددی تطابق مناسبی با نتایج مدل آزمایشگاهی داشته است. اختلاف اندکی که در فرم نمودارهای بارگذاری - نشست از آنالیزهای عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود، ناشی از ثابت در نظر گرفتن ضریب ارتجاعی خاک در مدل رفتاری به کار رفته در مدل عددی است. نتایج آنالیزهای ذکر شده نیز به صورت پارامتر بدون بعد ارائه شده است. پارامتر بدون بعد ظرفیت باربری پی در نسبت نشست به عرض پی مساوی ۰/۲ در مدل آزمایشگاهی برای مدل غیرمسلح، ۱۱۰ و برای مدل مسلح شده با نوارهای بدون مهار به طول ۲ برابر عرض پی، ۱۶۵ بوده است. آنالیزهای عددی نیز پارامتر بدون بعد ظرفیت باربری مدل غیرمسلح را ۱۰۴ و مدل مسلح شده با نوارهای به طول ۲ برابر عرض پی را ۱۶۱ کیلوپاسکال نشان داده‌اند. پیشینه‌ی خطای مدل عددی برای مدل غیرمسلح برابر ۵٪ بوده است. قابل توجه است که در نمودار اخیر، نتایج مربوط به آنالیزهای مدل غیرمسلح در دو حالت با اندازه‌های متفاوت شبکه‌بندی با تعداد ۱۳۱۲ و ۴۲۸۸ المان ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش اندازه‌ی المان‌ها تأثیری کمتر از ۱٪ در نتیجه‌ی نهایی داشته است، ولی زمان انجام آنالیزها حدود ۳ برابر شده است. لذا برای انجام آنالیزها از شبکه‌بندی توضیح داده شده در بخش مدل‌سازی عددی با ۱۳۱۲ المان استفاده شده است.

نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی برای مدل‌های مسلح شده با نوارهای با طول ۲ برابر عرض پی با مهار برگشتی به طول‌های ۵، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، که مطابق آن برای نسبت نشست به عرض پی مساوی ۰/۲،



شکل ۱۲. نسبت افزایش ظرفیت باربری در مدل مسلح با مهار برگشتی به مدل مسلح بدون مهار برگشتی با طول کل مسلح‌کننده‌ی برابر.

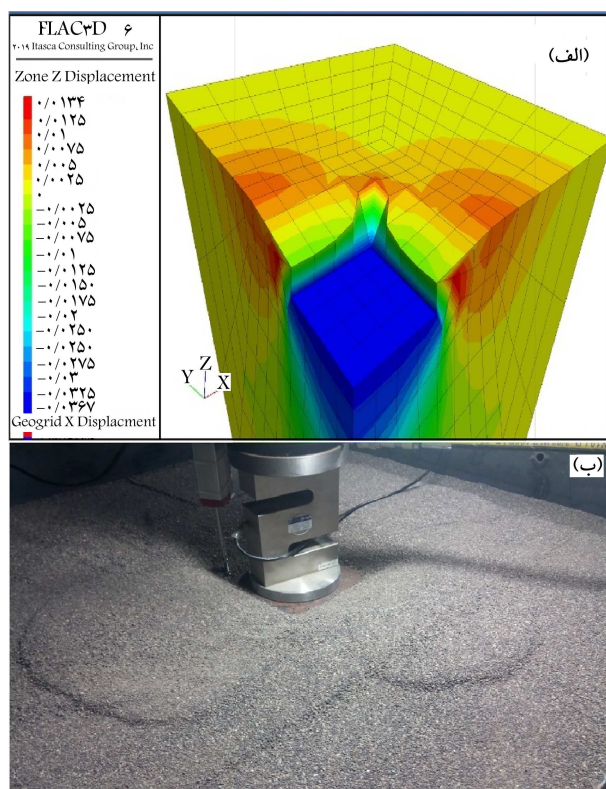


شکل ۱۳. مقایسه‌ی نسبت ظرفیت باربری در مدل مسلح با مهار برگشتی به مدل مسلح بدون مهار برگشتی بر اساس طول کل مسلح‌کننده.

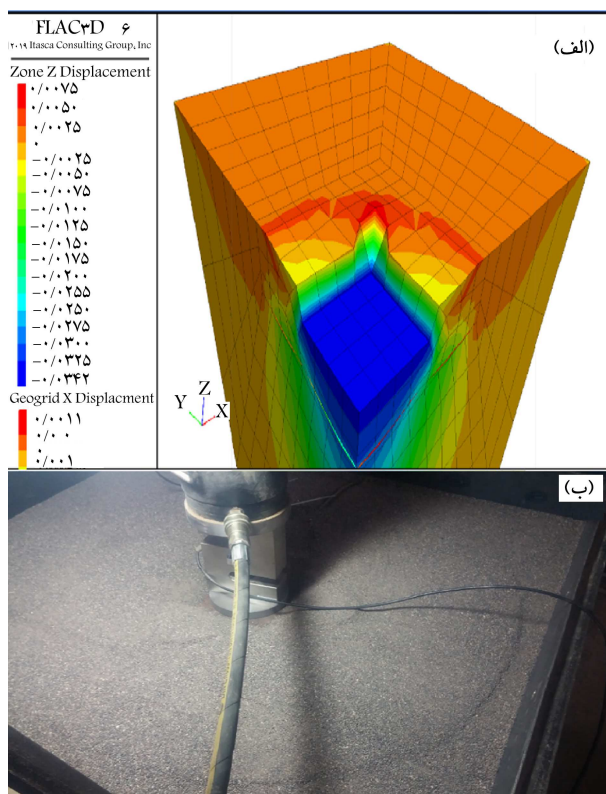
محصولیت زیادی که ایجاد شده است، ظرفیت باربری نهایی بیشتری داشته‌اند. برای بررسی دقیق‌تر اثر مهار برگشتی در افزایش ظرفیت باربری پی و مقایسه‌ی آن با اثر مسلح‌کننده‌های غیرمهار، نسبت افزایش ظرفیت باربری پی در مدل مسلح شده با مهار برگشتی به ظرفیت باربری پی در مدل مسلح شده بدون مهار با طول مسلح‌کننده‌های برابر در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

در دو مدل با مسلح‌کننده‌های بدون مهار به طول‌های ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متری، طول کلی مسلح‌کننده‌ی استفاده شده برابر ۲ مدل با مسلح‌کننده‌های مهار با طول مسلح‌کننده‌ی ۴۰ سانتی‌متر و طول‌های برگشت ۵ و ۱۰ سانتی‌متری بوده است. در شکل ۱۲، دو رفتار متفاوت برای اثر مهار برگشتی در نحوه‌ی افزایش ظرفیت باربری پی مشاهده می‌شود. با افزایش میزان نشست، ظرفیت باربری مدل‌هایی که مسلح‌کننده‌های مهار شده با طول برگشت کمتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر داشته‌اند، به ظرفیت باربری مدل مشابه با مسلح‌کننده‌ی با طول مشابه ولی بدون مهار میل کرده‌اند. این رفتار تفاوت اساس با مدل‌هایی دارد که در آنها طول برگشت مهار بیشتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر بوده است.

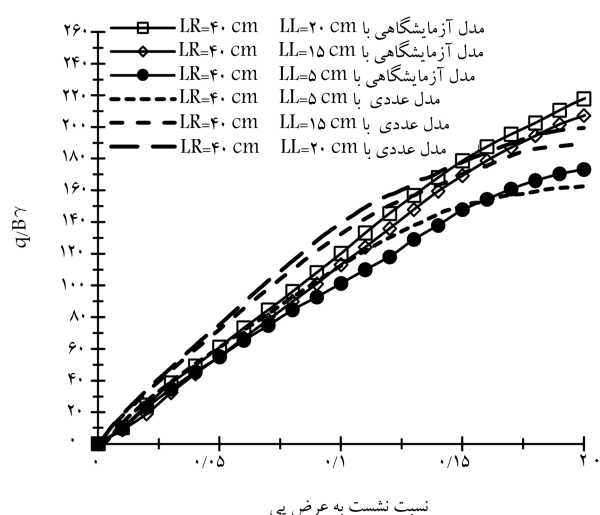
در شکل ۱۳، نسبت ظرفیت باربری مدل‌های دارای مهار برگشتی و مدل‌های بدون مهار با مسلح‌کننده‌های آزاد، بر اساس طول کلی مسلح‌کننده در نشست ۴ سانتی‌متر مقایسه شده است، که مطابق آن، نسبت‌های ظرفیت باربری پی روی ماسه‌ی مسلح شده بدون مهار با طول‌های ۵۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر به ظرفیت



شکل ۱۶. مقایسه تغییر شکل های خاک اطراف پی در سطح زمین برای مدل غیرمسلح به دست آمده از مدل های عددی و آزمایشگاهی.



شکل ۱۷. مقایسه تغییر شکل های خاک اطراف پی در سطح زمین برای مدل مسلح مهار شده به دست آمده از مدل های عددی و آزمایشگاهی.



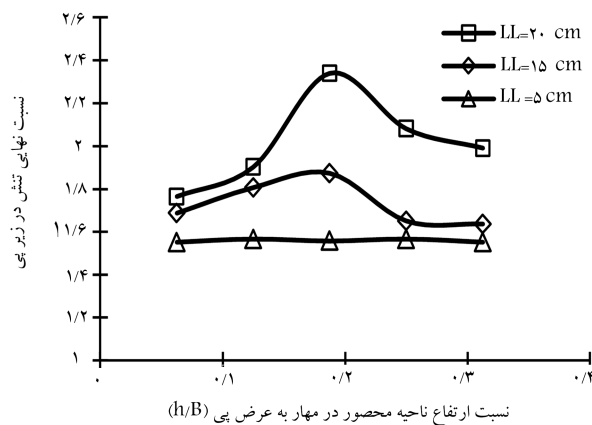
شکل ۱۵. مقایسه ی نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی برای مدل های مسلح شده ی مهار ی با طول برگشت ۵، ۱۵ و ۲۰ سانتی متر.

پارامتر بدون بُعد ظرفیت باربری مدل های آزمایشگاهی با طول های برگشت ۵، ۱۵ و ۲۰ سانتی متری به ترتیب برابر ۱۷۳، ۲۰۷ و ۲۱۸ بوده و برای مدل های اخیر، از مدل عددی ظرفیت باربری به ترتیب ۱۶۴، ۱۸۹ و ۱۹۹ کیلو پاسکال به دست آمده است. اختلاف نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بین ۵٪ تا ۹٪ بوده است، که قابل قبول است.

گسترش ناحیه ی گسیختگی در اطراف پی و بالادستی خاک اطراف پی پس از اتمام بارگذاری در مدل های آزمایشگاهی و عددی برای مدل غیرمسلح در شکل ۱۶ و برای مدل مسلح مهار شده با طول برگشت ۱۵ سانتی متر در شکل ۱۷ مشاهده می شود؛ که مطابق آنها در مدل غیرمسلح، ناحیه ی بالا زده در اطراف پی، بیشتر در مجاورت اضلاع پی قرار گرفته است، ولی برای مدل مسلح با مهار برگشتی، ناحیه ی بالا زده در تمام اطراف پی قرار داشته است. دلیل این موضوع وجود مسلح کننده در لبه های کناری پی بوده است، که باعث ایجاد محصوریت و گسترش ناحیه ی گسیختگی به گوشه ها شده است. سازگاری مد گسیختگی پی و نیز مقادیر عددی ظرفیت باربری بین مدل های عددی و آزمایشگاهی نشان می دهد که مدل عددی دقت کافی داشته است و می توان از مدل عددی برای بررسی های بیشتر استفاده کرد.

با توجه به محدودیت های مدل آزمایشگاهی، ابزار بندی و تعیین دقیق تنش در زیر پی امکان پذیر نبوده است. لذا بعد از صحت سنجی مدل عددی، از آنالیزهای عددی برای تعیین توزیع تنش در زیر پی استفاده شد. با توجه به این که مقاومت برشی خاک به عنوان یک مصالح دانه یی تابع تنش های محصور کننده است، لذا انتظار می رفت که ایجاد مهار برگشتی به واسطه ی افزایش محصورشدگی خاک باعث افزایش مقاومت برشی آن و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری پی شود.

برای بررسی های بیشتر، در شکل ۱۸ توزیع تنش همسان یا در واقع میانگین تنش های اصلی روی خط تقارن مدل در عمق ۵ الی ۷/۵ سانتی متری زیر پی نشان داده شده است؛ که مطابق آن برای مدل های غیرمسلح و یا مسلح بدون مهار، تنش همسان در زیر مرکز پی مقدار بیشینه داشته و با دور شدن از مرکز پی به شدت کم شده است. ولی در مدل هایی که خاک زیر پی با مهار برگشتی مسلح شده است، با افزایش طول مهار، توزیع تنش همسان در زیر پی تقریباً به صورت یکنواخت در آمده است. برای مهار های برگشتی با طول های ۱۵ و ۲۰ سانتی متر، که انتهای آزاد



شکل ۲۰. مقایسه‌ی اثر ارتفاع ناحیه‌ی مهاری در نسبت ظرفیت باربری.

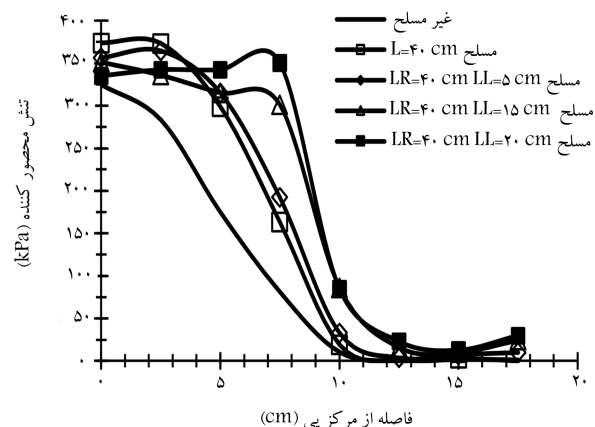
شبیه‌سازی شده، بیشترین ظرفیت باربری در ارتفاع ناحیه‌ی مهاری، ۳/۷۵ سانتی‌متر به دست آمده است، که حدود ۰/۲ عرض پی است.

۴. تعمیم نتایج مدل آزمایشگاهی به مقیاس واقعی

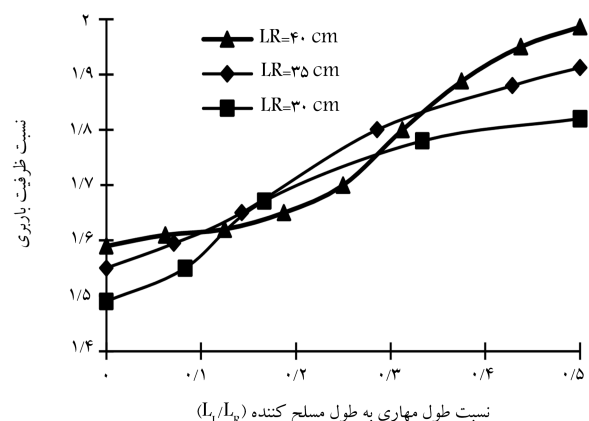
کاربرد نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی برای مقاصد عملی، نیازمند تعمیم نتایج آزمایشگاهی به مقیاس واقعی است؛ لذا در پژوهش حاضر، از مدل عددی استفاده شده است. برای مثال، تعمیم نتایج مطالعه‌ی حاضر، به یک پی منفرد مربعی‌شکل به ابعاد 2×2 مترمربع در مقیاس واقعی، با توجه به ابعاد مدل آزمایشگاهی مطابق جدول ۳، ضریب مقیاس n ، برابر ۱۰ است. سطح تنش در زیر پی نیز در مدل واقعی، ۱۰ برابر سطح تنش در مقیاس آزمایشگاهی خواهد بود، لذا ضریب ارتجاعی خاک در شرایط واقعی ۱۰ برابر ضریب ارتجاعی خاک در مقیاس آزمایشگاهی خواهد بود. همچنین با توجه به خط سازگاری مدل و مقیاس واقعی در شکل ۶، تخلخل مینا در زیر پی در مقیاس واقعی از رابطه‌ی ۲ تعیین شده است:

$$(2) \quad 0.558 = 0.595 - 0.16 \ln(10)$$

با توجه به رابطه‌ی اخیر، تمامی مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه در مقیاس ۱۰ برابر مقیاس مدل آزمایشگاهی باید در نسبت تخلخل 0.558 تعیین شود. در چنین شرایطی وزن مخصوص خاک برابر $17/22$ کیلونیوتن بر مترمکعب خواهد بود. گرچه در آنالیزهای ابعادی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و ظاهری بدون بُعد و ثابت در نظر گرفته می‌شود، ولی تغییرات سطح تنش و تخلخل خاک باعث تغییرات آنها نیز خواهد شد. افزایش سطح تنش باعث کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و ظاهری ماسه و نیز کاهش تخلخل، باعث افزایش آنها خواهد شد. لذا با توجه به نکات ذکر شده، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، زاویه‌ی اتساع ماسه و نیز زاویه‌ی اصطکاک ظاهری ماسه با مسلح‌کننده در مقیاس واقعی، مساوی مقادیر آنها در مقیاس آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است، ولی عملاً ممکن است مقادیر مذکور متفاوت باشند. با توجه به جدول ۳، برای حفظ تشابه ابعادی، باید ضخامت و سختی مسلح‌کننده‌ی استفاده شده در مقیاس واقعی، ۱۰ برابر ضخامت و سختی مسلح‌کننده‌ی استفاده شده در آزمایشگاه باشد. عملاً استفاده از چنین ضخامتی، معقول و منطقی نیست. لذا برای تعمیم نتایج آزمایشگاهی به مقیاس واقعی، سختی و ضخامت مسلح‌کننده در مقیاس واقعی برابر سختی و ضخامت آن در آزمایشگاه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی اثر مهاری در توزیع تنش همسان در زیر پی.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی اثر طول مهاری در نسبت ظرفیت باربری.

مهاری برگشتی کاملاً در زیر پی قرار گرفته است، توزیع تنش همسان تفاوت معنی‌داری داشته است. زیرا در شرایط ذکر شده، در اثر تنش‌های وارده، انتهای آزاد مهاری کاملاً در داخل توده‌ی خاک مهاری و باعث افزایش چشمگیر محصورشدگی در خاک شده است.

در شکل ۱۹، اثر نسبت طول برگشت مهاری به طول مسلح‌کننده (L_L/L_R) برای ۳ طول مختلف مسلح‌کننده‌های ۳۰، ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متری در ظرفیت باربری مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش طول برگشت مهاری، نسبت ظرفیت باربری پی به ظرفیت باربری پی غیرمسلح افزایش یافته است. تقریباً در هر ۳ منحنی، تغییر شیبی صورت گرفته است، که با افزایش طول مسلح‌کننده، محل تغییر شیب نیز افزایش یافته است. محل تغییر شیب منحنی متناسب با محل قرارگیری انتهای آزاد مهاری در زیر پی یا خارج آن است. آریا و همکاران (۲۰۱۹)، یک رابطه‌ی خطی برای تأثیر طول برگشت مهاری در افزایش نسبت باربری برای پی‌های نواری ارائه کرده‌اند. ولی بررسی دقیق نتایج آنها نیز وجود شکستگی در مجاورت لبه‌ی پی را نشان می‌دهد.

همچنین در شکل ۲۰، اثر ارتفاع ناحیه‌ی محصور مهاری، پارامتر h در شکل ۳، در نسبت ظرفیت باربری پی روی ماسه‌ی مسلح به ظرفیت باربری پی روی ماسه‌ی غیرمسلح، که از آنالیزهای عددی حاصل شده است، مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۲۰، برای طول مهاری ۵ سانتی‌متر، تغییرات ارتفاع ناحیه‌ی مهاری تأثیر چندانی در نسبت ظرفیت باربری پی نداشته است، ولی با افزایش طول مهاری، تأثیر ارتفاع ناحیه‌ی مهاری در نسبت ظرفیت باربری افزایش یافته است. برای مدل

در ظرفیت باربری پی به دلیل کاهش نسبت سختی مسلح‌کننده به سختی خاک در مقیاس واقعی بوده است. گرچه استفاده از همان مسلح‌کننده در مقیاس واقعی باعث کاهش راندمان تسلیح می‌شود، ولی همچنان تأثیر تسلیح و نیز ایجاد مهار برگشتی در انتهای آزاد مسلح‌کننده در افزایش ظرفیت باربری پی قابل توجه است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر ایجاد مهار برگشتی در انتهای آزاد مسلح‌کننده‌ها در افزایش ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح به روش‌های آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های خاک غیرمسلح، مسلح شده‌ی غیرمهار و مهار شده انجام و نتایج به دست آمده با هم مقایسه شده است. مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی و سپس از آن برای بررسی اثر ایجاد مهار برگشتی در توزیع تنش در زیر پی استفاده شده است همچنین مدل عددی کالیبره شده برای تعمیم نتایج مدل آزمایشگاهی به مقیاس واقعی استفاده شده است. نتایج به دست آمده از مطالعات اخیر را می‌توان در حالتی که طول مهار برگشتی ۲ برابر عرض پی و عمق قرارگیری آن $\frac{1}{3}$ عرض پی باشد، به این صورت خلاصه کرد:

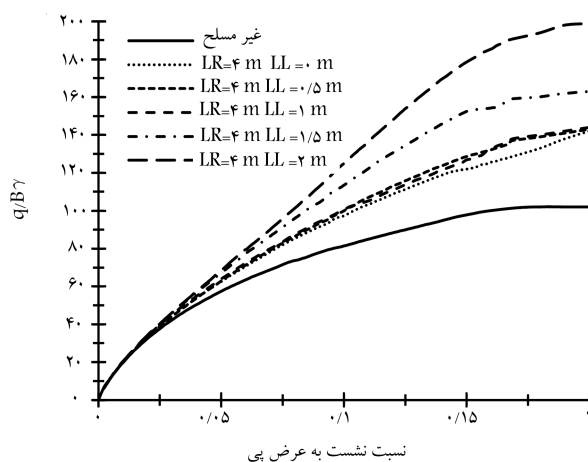
۱- برای طول‌های برگشت مهار کوتاه، افزایش چندانی در ظرفیت باربری پی مشاهده نمی‌شود. اگر طول برگشت مهار به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد که انتهای آزاد مهار در زیر پی قرار گرفته باشد، افزایش چشمگیری در ظرفیت باربری پی مشاهده خواهد شد.

۲- با افزایش میزان نشست، ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک مسلح شده با مهار کوتاه به سمت ظرفیت باربری پی‌های واقع بر روی خاک مسلح مهار نشده با طول برابر میل می‌کند. با افزایش طول برگشت مهار، افزایش ظرفیت باربری پی با افزایش نشست بیشتر می‌شود.

۳- در شرایط مشابه برای یک طول برابر مسلح‌کننده، ایجاد مهار برگشتی در انتهای مسلح‌کننده‌ها، بسته به طول مهار برگشتی باعث افزایش ظرفیت باربری از ۳ تا ۲۷ درصد می‌شود.

۴- ایجاد مهار برگشتی در انتهای آزاد مسلح‌کننده‌ها باعث افزایش محصورشدگی در خاک زیر پی می‌شود و با افزایش طول برگشت مهار، توزیع تنش محصورکننده زیر پی افزایش می‌یابد و نیز یکنواخت‌تر می‌شود.

۵- برای یک پی منفرد با مقیاس واقعی روی ماسه و همان مسلح‌کننده‌ی استفاده شده در مدل آزمایشگاهی، تأثیر تسلیح و نیز ایجاد مهار در انتهای مسلح‌کننده‌ها کمتر از مقادیر به دست آمده برای مدل آزمایشگاهی خواهد بود. کاهش اخیر به دلیل کاهش نسبت سختی مسلح‌کننده به سختی خاک است.



شکل ۲۱. تعمیم نتایج آزمایشگاهی به مدل واقعی با ابعاد 2×2 متر مربع برابر با روش عددی.

در نتیجه، تعمیم نتایج آزمایشگاهی به مقیاس واقعی برای تعیین اثر مهار برگشتی در ظرفیت باربری یک پی منفرد با ابعاد 10×10 برابر ابعاد آزمایشگاهی بر روی ماسه‌ی مشابه تسلیح شده با همان مسلح‌کننده به طول آزاد ۲ برابر عرض پی و طول‌های مهار برگشت متفاوت، صورت گرفته است. ابعاد و شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل عددی تهیه شده در مقیاس واقعی دقیقاً متناسب با مدل عددی کالیبره شده با مدل آزمایشگاهی بوده است. در شکل ۲۱، نتایج آنالیزهای عددی انجام شده در مقیاس واقعی مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۲۱، در شرایط غیرمسلح، پارامتر بدون بُعد ظرفیت باربری تقریباً برابر مقدار آن در مدل آزمایشگاهی بوده است. اختلاف ناچیز مقادیر آنها ناشی از تغییر وزن مخصوص در مقیاس واقعی بوده است. تسلیح خاک با مسلح‌کننده با انتهای آزاد به طول ۴ متر با ۲ برابر عرض پی، باعث افزایش ۴۱ درصدی ظرفیت باربری پی نسبت به حالت غیرمسلح شده است، در حالی که مقدار اخیر در مقیاس آزمایشگاهی برابر ۵۲٪ بوده است. در مقیاس واقعی، ایجاد مهار برگشتی به طول‌های ۵/۰ متر و ۱ متر ($\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{2}$ برابر عرض پی) در انتهای مسلح‌کننده، تأثیر چندانی در افزایش ظرفیت باربری پی نداشته است؛ در حالی که در مقیاس آزمایشگاهی، ایجاد مهار برگشتی به طول $\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{2}$ برابر عرض پی باعث افزایش ۵ و ۷ درصدی ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون مهار شده است. با افزایش طول مهار برگشتی، تأثیر آن در افزایش ظرفیت باربری نیز بیشتر شده است. برای طول مهار برگشتی ۷۵/۰ و ۱ برابر عرض پی، افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون مهار در مقیاس واقعی به ترتیب برابر ۶۰ و ۹۵ درصد بوده است؛ ولی مقادیر ذکر شده در مقیاس آزمایشگاهی به ترتیب برابر ۹۹ و ۱۱۰ درصد بوده‌اند. کاهش تأثیر تسلیح و مهار

پانویس‌ها

1. Geotextile
2. Geogrid
3. Geocell

4. Xu
5. Kazi
6. Aria
7. Raja
8. Shukla
9. Altaee

10. Fellenius

منابع (References)

1. Ouria, A., Toufigh, V., Desai, C. and et al. "Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall", *Geomechanics and Engineering*, **10**(6), pp. 757-774 (2016).
2. Toufigh, V., Desai, Ch., Saadatmanesh, H. and et al. "Constitutive modeling and testing of interface between backfill soil and fiber-reinforced polymer", *ASCE International Journal of Geomechanics*, **14**(3), 04014009 (2013).
3. Ouria, A., Mahmoudi, A. and Sadeghpour, H. "Effect of the geotextile arrangement on the bearing capacity of a strip footing", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **6**(36) (2020). <https://DOI.org/10.1007/s40891-020-00219-w>
4. Abu-Farsakh, M., Chen, Q. and Sharma, R. "An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic reinforced sand", *Soils and Foundations*, **53**(2), pp. 335-348 (2013).
5. Basudhar, P.K., Saha, S. and Deb, K. "Circular footings resting on geotextile-reinforced sand bed", *Geotextiles and Geomembranes*, **25**(6), pp. 377-384 (2007).
6. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(1), pp. 72-84 (2010).
7. Guido, V.A., Chang, D.K. and Sweeney, M.A. "Comparison of geogrid and geotextile reinforced earth slabs", *Canadian Geotechnical Journal*, **23**(4), pp. 435-440 (1986).
8. Cicek, E., Guler, E. and Yetimoglu, T. "Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil", *Soils and Foundations*, **55**(4), pp. 661-677 (2015).
9. Toufigh, V., Ouria, A., Desai, C.S. and et al. "Interface behavior between carbon-fiber polymer and sand", *Journal of Testing and Evaluation*, **44**(1), pp. 385-390 (2015).
10. Toufigh, V., Saeid, F., Toufigh, V. and et al. "Laboratory study of soil-CFRP interaction using pull-out test", *Geomech. Geoengin.*, **9**(3), pp. 208-214 (2014).
11. Ouria, A., Karamzadegan, S. and Emami, S. "Interface properties of a cement coated geocomposite", *Construction and Building Materials*, **266**(Part B), 121014 (2021).
12. Ouria, A., Emami, S. and Karamzadegan, S. "Laboratory investigation of the effect of the cement treatment of interface on the pullout capacity of reinforcement", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **52**(11) pp. 1-3 (2021).
13. Ouria, A. and Mahmoudi, A. "Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface", *Geotextiles and Geomembranes*, **46**(1) pp. 29-39 (2018).
14. Lajevardi, S.H., Briangon, L. and Dias, D. "Experimental studies of the geosynthetic anchorage – effect of geometric parameters and efficiency of anchorages", *Geotextiles and Geomembranes*, **42**(5), pp. 505-514 (2014).
15. Lajevardi, S.H., Silvani, C., Dias, D. and et al. "Geosynthetic anchorage with wrap around: experimental and numerical studies", *Geosynthetics International*, **22**(4), pp. 273-287 (2015).
16. Xu, Y., Williams, D.J. and Serati, M. "Influence of anchorage angles on pull-out resistance of geotextile wrap around anchorage", *Geosynthetics International*, **25**(4), pp. 378-391 (2018).
17. Kazi, M., Shukla, S.K. and Habibi, D. "Behaviour of an embedded footing on geotextile-reinforced sand", *Ground Improv.*, **169**(2), pp. 120-133 (2016).
18. Aria, S., Shukla, S.K. and Mohyeddin, A. "Numerical investigation of wraparound geotextile reinforcement technique for strengthening foundation soil", *International Journal of Geomechanics*, **19**(4) (2019).
19. Raja, M.N.A. and Shukla, S.K. "Ultimate bearing capacity of strip footing resting on soil bed strengthened by wraparound geosynthetic reinforcement technique", *Geotextiles and Geomembranes*, **48**(6), pp. 867-874 (2020).
20. ASTM D2487-11, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", *ASTM International, West Conshohocken, PA* (2011).
21. ASTM D3080 / D3080M-11, "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions (withdrawn 2020)", *ASTM International, West Conshohocken, PA* (2011).
22. ASTM C127-07, "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate", *ASTM International, West Conshohocken, PA* (2007).
23. ASTM D2216-10, "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass", *ASTM International, West Conshohocken, PA* (2010).
24. ASTM D3039 / D3039M-17, "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials", *ASTM International, West Conshohocken, PA* (2017).
25. Sadeghpour, H. "Bearing capacity of a spread footing on CFRP reinforced sand", *M.Sc. Dissertation, University of Mohaghegh Ardabili* (2016).
26. Hajiazizi, M., Bavali, M. and Fakhimi, A. "Numerical and experimental study of the optimal location of concrete piles in saturated sandy slope", *Int. J. Civ. Eng.*, **16**, pp. 1293-1301 (2018).

27. Ouria, A. and Heidarly, E. "Laboratory investigation of the effect of the geotextile placement pattern on the bearing capacity of footing on reinforced sand", *Modares Civil Engineering Journal*, **21**(3), pp. 21-34 (2021).
28. Altaee, A. and Fellenius, B. "Physical modeling in sand", *Canadian Geotechnical Journal*, **31**(3), pp. 420-431 (1994).
29. Been, K. and Jefferies, M.G. "A state parameter for sands", *Geotechnique*, **35**(2), pp. 99-112 (1985).
30. Roscoe, K.H. and Poorooshasb, H. "Fundamental principle of similarity in model test for earth pressure problems" *In Proceedings of the 2nd Asian Regional Conference on Soil Mechanics Bangkok, Thailand*, **1**, pp. 134-140 (1963).