

## اندازه‌گیری تغییر شکل خاک ماسه‌ای سست مسلح‌شده با ژئوسنتتیک‌ها با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی

فروغ اشکان<sup>\*</sup>

۱- مربی گروه عمران دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۱۲

### چکیده

خاک مسلح انتخاب مناسبی برای سازه‌هایی مانند دیوارهای ساحلی، سد خاکی، ساختمان دیوارهای نگهبان به‌ویژه در پایه‌های کناری پل‌ها، دیوارهای کناری آبروها و مسیل‌ها، حوضچه‌های رسوبگیر و شبکه‌های آبیاری و زهکشی است. در این پژوهش، سیستم خاک مسلح برای افزایش ظرفیت باربری خاک زیر فونداسیون سازه‌ها به کار رفته است. یک مدل کوچک آزمایشگاهی برای بررسی رفتار خاک ماسه‌ای مسلح‌شده با ژئوسنتتیک‌ها ساخته شده است. بردارهای جابه‌جایی خاک و ظرفیت باربری پی نواری در حالت مسلح و غیر مسلح اندازه‌گیری شده است تا تأثیر پارامترهای متغیر از جمله نوع مسلح‌کننده، تعداد لایه‌های مسلح‌کننده، عمق اولین لایه و پهنای لایه‌ها بررسی شود. در ادامه، مدل عددی با همان اندازه مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار Plaxis ایجاد و نتایج به دست آمده با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. به طور کلی در مسلح‌کننده ژئوگرید نسبت به مسلح‌کننده ژئوتکستایل و حالت غیر مسلح، حجم وسیعی از خاک مسلح در برابر اعمال بار مقاومت می‌کند و خاک ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان می‌دهد. با افزایش تعداد و پهنای لایه‌ها نیز این عملکرد مشاهده می‌شود. بررسی عملکرد مسلح‌کننده‌ها و خاک ماسه‌ای در مدل‌سازی فیزیکی با روش PIV و در شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis v8.2، حاکی از افزایش حجم گوه گسیختگی در عمق و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری پی نواری در حالت مسلح، نسبت به حالت غیر مسلح، است.

### واژه‌های کلیدی

پی نواری، خاک ماسه‌ای مسلح، مدل آزمایشگاهی (PIV)، نرم‌افزار Plaxis

### مقدمه

که در این تحقیق با ژئوگرید یا ژئوتکستایل که از گروه ژئوسنتتیک‌ها هستند تقویت می‌شود. مسلح‌کننده باعث بهبود خواص مکانیکی خاک از طریق تقویت نیروی کششی می‌شود و نیروی برشی را که خاک منتقل می‌کند کاهش می‌دهد.

همچنین، در این پژوهش سیستم خاک مسلح تقویت شده با ژئوسنتتیک‌ها خشک است. ولی در عمل

خاک محیط دانه‌ای طبیعی حاصل از فرسایش و دگرگونی سنگ‌هاست که در برابر فشار و برش مقاومت خوبی دارد اما مقاومت آن در مقابل کشش بسیار ضعیف است. تلاش‌های متعددی به منظور غلبه بر ضعف کششی خاک شده است و این تلاش‌ها نهایتاً منجر به کاربرد روش مسلح‌سازی خاک شده است. خاک مسلح از دو نوع ماده مختلف (خاک و تقویت‌کننده) ساخته شده است

مقدس تفرشی و داوسون (Moghaddas-Tafreshi & Dowson, 2010) ظرفیت باربری پی نواری روی ماسه را با مسلح‌کننده ژئوسل و ژئوتکستایل مقایسه کردند. پارامترهای متغیری شامل تعداد لایه تقویت‌کننده، فاصله بین لایه‌های تقویت‌کننده، عمق اولین لایه تقویت‌کننده بررسی شد. برخلاف سایر تحقیقات، عملکرد ژئوسل و ژئوتکستایل در تراز نشست پایین بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ظرفیت باربری با افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده، عمق اولین لایه تقویت‌کننده و عرض تقویت‌کننده ژئوسل کاهش می‌یابد. در کل، نتایج به‌دست آمده نشان داد که مسلح‌کننده ژئوسل، رفتار بسیار سخت‌تری دارد و ظرفیت باربری بیشتر و نشست کمتری تحمل می‌کند. بنابراین، برای بهبود ظرفیت باربری و نشست پی از ژئوسل، در مقایسه با ژئوتکستایل، استفاده کردند.

کیمینگ و موراد (Qiming & Murad, 2015) برای تخمین ظرفیت باربری نهایی شالوده نواری راه حل‌هایی تحلیلی ارائه کردند. این محققان گسیختگی کلی را برای فونداسیون مسلح مطرح کردند. تجزیه و تحلیل پایداری حد تعادل فونداسیون خاک مسلح بر اساس مکانیزم شکست پیشنهادی انجام شد. این مطالعه نشان داد که عمق منطقه گسیختگی برشی سوراخ‌کننده، (DP)، بستگی دارد به مقاومت نسبی لایه خاک مسلح و لایه خاک تقویت نشده و رابطه مستقیم دارد با نسبت مسلح (Rr). حاجی‌علیلوی بناب و همکاران (Hajjalilue-Bonab *et al.*, 2012) مکانیزم گسیختگی، تغییر شکل خاک ماسه‌ای و تأثیر مسلح‌کننده‌ها را بر این فرآیند در زیر یک پی نواری به کمک روش PIV بررسی کردند. بدین منظور روی خاک ماسه‌ای به شکل فیزیکی مدل‌سازی و برای مسلح‌سازی نیز از مواد ژئوسنتتیکی مناسب استفاده کردند. در هر مرحله از بارگذاری، از توده تغییر شکل یافته

در مصارفی چون شبکه‌های آبیاری و زهکشی ممکن است در بعضی فصول، خاک اشباع گردد. از این رو خاک مسلح باید خاصیت زهکشی داشته باشد. معمولاً مصالح دانه‌ای مصرفی در خاک مسلح باید به‌عنوان زهکش عمل کند. ولی اگر خاک مصرفی خاصیت زهکشی مناسبی نداشته باشد و احتمال اشباع آن وجود داشته باشد، باید تمهیداتی خاص برای زهکشی آن در نظر گرفت (Movahedan, 2012). دانشمندان روی رفتار خاک مسلح در زیر پی‌های نواری تحقیق کرده‌اند. ترزاقی اولین کسی است که نظریه‌ای برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی‌های سطحی ارائه کرد. هوانگ و منک (Huang & Menq, 1997) روش آنالیز ایستایی را با استفاده از روش تعادل حدی برای زمین ماسه‌ای مطرح کردند که به‌طور افقی مسلح‌شده بود؛ این محققان اثر آرایش و خواص مسلح‌کننده‌ها و الگوی شکست ماسه مسلح‌شده را نشان دادند و تطابق مقادیر به‌دست آمده از مدل پیشنهادی را با اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده از مدل آزمایشگاهی گزارش کردند.

یاماموتو (Yamamoto, 1998) روی رفتار تدریجی شکست فونداسیون مسلح تحقیق کردند. وی با استفاده از شبیه‌سازی زمین با میله‌های آلومینیمی ابتدا یک‌سری مدل آزمایشگاهی بارگذاری ایجاد نمود. این در حالی بود که طول و خواص مسلح‌کننده در حال تغییر بودند. بر اساس این آزمایش‌ها نه فقط ظرفیت باربری، بلکه پیشرفت مکانیزم گسیختگی به کمک آنالیز پردازش تصویری بررسی شد. نتایج حاصل از این طرح حاکی از آن است که خواص تغییر شکل فونداسیون مسلح متفاوت از خواص تغییر شکل فونداسیون غیر مسلح است که به وضعیت تقویت‌کنندگی از جمله تعداد و پهنای لایه‌ها، عرض فرورفتگی، عمق و سختی خمشی مواد مسلح‌کننده بستگی دارد.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات مدل آزمایشگاهی

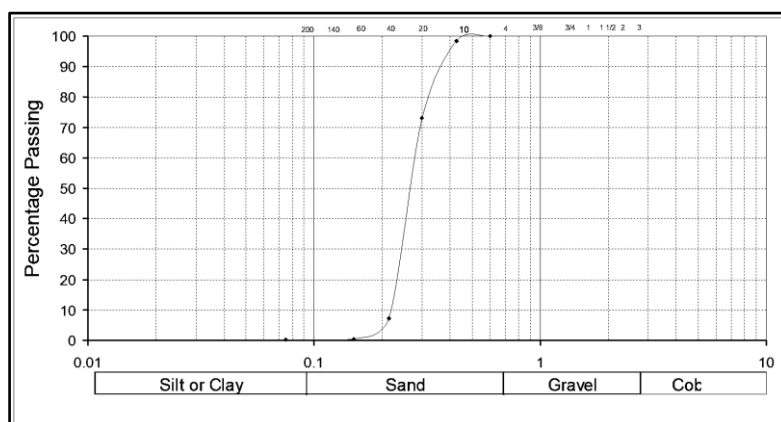
در این تحقیق، از ماسه خشک منطقه صوفیان استان آذربایجان شرقی واقع در شمال غرب ایران استفاده شده است. برای نیل به هدف و یافتن نتایج قابل استفاده از آزمایش‌های مدل فیزیکی، لازم است تا مدل‌های ساخته شده به صورت ماسه شل با دانسیته نسبی ۱۵ تا ۵۰ درصد باشند.

برای تعیین مشخصات ماسه، آزمایش‌های دانه‌بندی مطابق با استاندارد (ASTM D 422-87) به اجرا درآمد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ماسه با  $\phi = 26/82$  درجه و با  $c = 0/33$  کیلو نیوتن بر متر مربع و با وزن مخصوص ویژه  $G_s = 2/67$ ، دارای وزن واحد حجم در حالت سست  $1/5$  گرم بر سانتی‌متر مکعب است. ماسه مورد نظر دارای ضریب یکنواختی  $C_u$ ، برابر با  $1/25$  و ضریب خمیدگی  $C_c$ ، برابر با  $0/996$  به‌عنوان ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی گردید. منحنی دانه‌بندی این نوع ماسه در شکل ۱ نشان داده شده است. برای محاسبه مدول الاستیسیته خاک، از آزمایش سه محوری استفاده شده است که بهترین روش برای محاسبه E است (Jafari-Bari, 2005).

خاک عکسبرداری دیجیتالی شد و تصاویر پردازش شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مسلح‌کننده‌های مناسب منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت باربری، کاهش میزان نشست پی، و تغییر در مکانیسم گسیختگی می‌شود و همچنین کارایی بهتر ژئوگرید نسبت به ژئوتکستایل در خاک‌های ماسه‌ای و در محدوده کرنش‌های کوچک ثابت می‌گردد.

نتیجه واحدی که همه محققان به آن دست یافته‌اند افزایش چشمگیر ظرفیت باربری خاک با قرار دادن مسلح‌کننده در عمقی مشخص از زیر پی است.

با اینکه تحقیقات در مورد افزایش ظرفیت باربری خاک مسلح فراوان است در این پژوهش برای بررسی نحوه تأثیر این مسلح‌کننده‌ها روی تغییر شکل خاک از مدل فیزیکی و از روش PIV استفاده شده است. همچنین، با استفاده از روش المان محدود و با کمک نرم‌افزار PLAXIS، تأثیر نحوه آرایش مسلح‌کننده‌ها بر تغییر شکل خاک نیز ارزیابی شده است. بردارهای جابه‌جایی خاک در این دو مدل با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا مکانیزم گسیختگی خاک با مکانیزم گسیختگی ارائه شده توسط ترزاقی مقایسه شود.



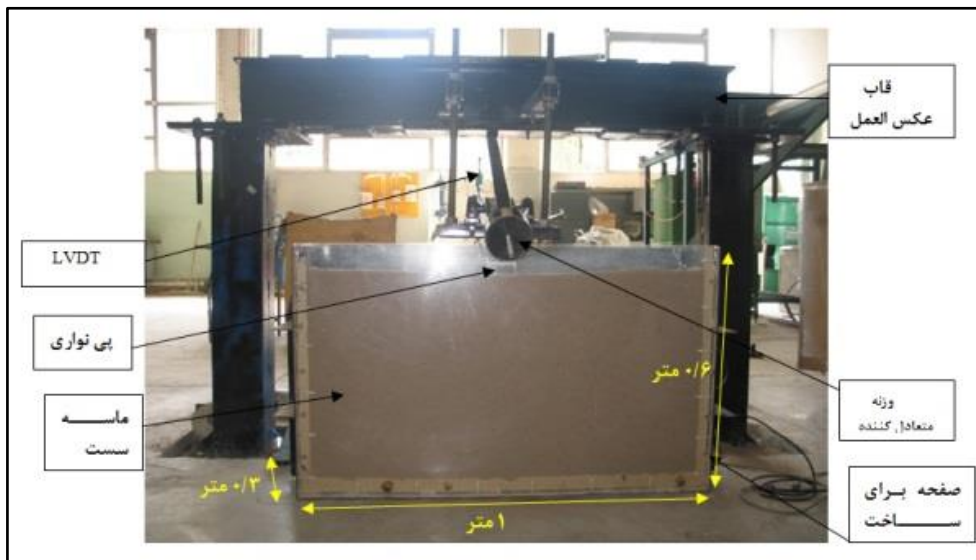
شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای

توجه به معیارهای موجود برای ساخت مدل و ایجاد سازه‌های صلب، ابتدا یک پی نواری بتن آرمه به طول  $1/8$

در ساخت پی خاکی مسلح مورد آزمایش، از دو نوع مسلح‌کننده ژئوگریدها و ژئوتکستایل‌ها استفاده شد. با

طراحی شدند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای ستون‌ها از اتصال دو ناودانی UNP ۱۶۰ و برای تیر نیز از اتصال دو ناودانی UNP ۲۰۰ استفاده شده است و بعداً تیر و ستون با تسمه و لچکی تقویت شده‌اند. شکل ۲، سازه نگهدارنده سیستم اعمال نیرو را نشان می‌دهد.

عرض ۰/۴۰ و ارتفاع ۰/۵۰ متر ایجاد گردید و در دو انتهای آن، صفحه پای ستون برای نصب ستون‌ها همراه با ۶ بولت طوری جایگذاری شدند که بعدها در صورت انتقال سیستم به نقاط دیگر آزمایشگاه، جداکردن ستون‌ها از صفحات آسان باشد. به‌همین ترتیب اتصالات تیر و ستون نیز



شکل ۲ - سازه نگهدارنده جک و محفظه مدل آزمایشگاهی

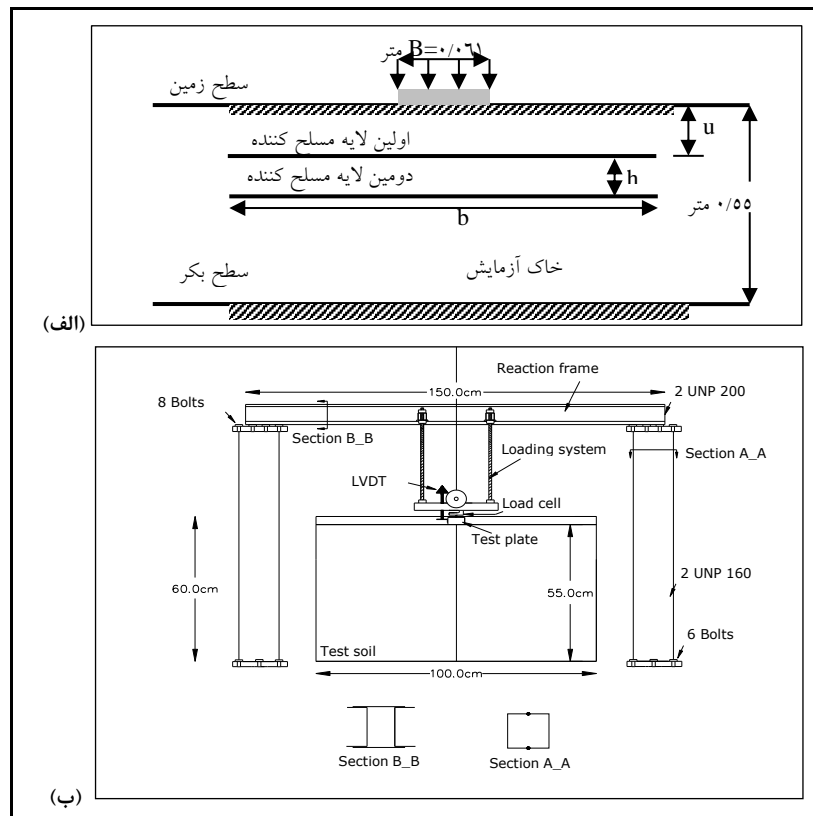
گردید تا میدان تغییر شکل توده نمایان باشد. برای اعمال بار از یک سیستم نیرو کنترل استفاده شده است که در آن وزنه‌ها تا لحظه گسیختگی نمونه افزایش داده می‌شوند. سیستم اعمال بار دارای بازویی به ابعاد  $۰/۰۳ \times ۱/۱$  و به ضخامت  $۰/۰۳$  متر است که به یک طرف آن وزنه‌ای به جرم ۳ کیلوگرم برای حفظ تعادل در سیستم نصب شده است. بار اعمالی درست به مرکز پی نواری اثر می‌کند و برای اندازه‌گیری بار وارد شده از یک load cell دیجیتالی استفاده شد که مستقیماً به دیتالاگر وصل شده است. برای انتقال نیروی وارد شده به خاک مورد آزمایش، از یک صفحه صلب فلزی به ضخامت  $۳/۰۶$  سانتی‌متر و به ابعاد  $۰/۳ \times ۰/۰۶۱$  متر استفاده شد که به‌عنوان شالوده نواری سطحی روی بستر خاک عمل می‌کند. برای اندازه‌گیری نشست صفحه نیز

برای ساخت محفظه آزمایشگاهی که باید خاک در داخل آن قرار می‌گرفت، از صفحات فلزی به ضخامت  $۳/۹$  میلی‌متر استفاده شد که با توجه به ضخامت و نحوه اتصالات تا حد قابل قبولی صلب بودند. از این صفحات در ابعاد  $۰/۳۰ \times ۱$  متر در زیر محفظه و  $۰/۳۰ \times ۰/۶۰$  متر در کناره‌ها و  $۰/۶۰ \times ۱$  متر در پشت محفظه استفاده شد. در اطراف دیواره‌ها نیز برای جلوگیری از تغییر شکل جانبی دیواره در اثر فشار جانبی خاک، از صفحاتی به عرض  $۵/۱۳$  سانتی‌متر و به ضخامت  $۳/۳۴$  میلی‌متر استفاده شد که به قسمت بیرونی دیواره‌ها متصل شده بودند. برای عکسبرداری از سیستم در بارگذاری‌های متوالی، در یک طرف محفظه طلق شفاف (پلکسی‌گلاس) به ابعاد  $۱۰۰ \times ۶۰$  سانتی‌متر و به ضخامت ۳۰ میلی‌متر با پیچ در سه وجه مدل متصل

اندازه‌گیری تغییر شکل خاک ماسه‌ای سست مسلح‌شده...

لایه‌های مسلح‌کننده (N)، عمق اولین لایه مسلح‌کننده (u)، پهناهای مسلح‌کننده‌ها (b)، عرض پی نواری نشان داده شده است. شماتیک مدل آزمایشگاهی نیز در شکل ۳-ب آمده است.

یک سنسور جابه‌جایی دیجیتالی (LVDT) به کار گرفته شد که روی صفحه و نزدیک به مرکز صفحه قرار می‌گرفت؛ اعداد قرائت شده با سنسور، نشست صفحه در نظر گرفته می‌شد. در شکل ۳-الف تعداد



شکل ۳ الف و ب- پارامترها و شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی

بعد از قرارگیری نیروسنج و نشست‌سنج، سیستم اعمال نیرو آماده آزمایش گردید. نحوه بارگذاری نیز به صورت دستی است. بعد از هر اعمال بار، باید منتظر بود تا مقدار بار و نشست ثبت شده با دیتالاگر، ثابت شود؛ بعد از عکسبرداری دیجیتالی با دوربین، با استفاده از نرم‌افزار Geopiv8 (Adrian, 1991) تصاویر پردازش شدند. در این تحقیق با مش بندی عکس‌های گرفته شده به مش‌های (۴۸×۴۸) بافت تصویر مناسبی جهت تحلیل ایجاد شد و جابه‌جایی مش‌ها در توده خاک در حال تغییر شکل به دست آمد. سپس تغییر شکل‌های به وجود آمده در

یکی از نکات قابل توجه در ساخت مدل‌های فیزیکی، رعایت یکنواختی مدل و پیوستگی در ریزش ماسه است. بدین منظور در سطح مدل باید ریزش به صورت خطی و یکنواخت باشد که در تمامی مدل‌ها با استفاده از روش بارانی هم از نظر طولی و ارتفاعی، یکنواختی کامل رعایت شد. بعد از اتمام خاکریزی تا تراز هر مسلح‌کننده و صاف کردن سطح خاک، مسلح‌کننده در موقعیت خود قرار داده شد و پس از آن خاکریزی تا ارتفاع کامل به همین صورت تداوم یافت. پی نواری به آرامی روی سطح خاک و زیر اهرم سیستم بارگذاری قرار داده شد و

خاک و مکانیزم گسیختگی آن بررسی شد و برای بررسی پارامتریک موارد ذکر شده، آزمایش‌های متناسب با استفاده از ژئوگریدها یا ژئوتکستایل‌ها با تعداد و فواصل مختلف انجام گرفته و به بررسی نحوه آرایش ژئو پارامتر A و ژئوگرید با پارامتر B نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های ساخته شده در آزمایشگاه و نرم‌افزار Plaxis

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
نوع مسلح‌کننده	A	A	A	A	A	A	B	غیر مسلح	A	B
N	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	-	۲	۱
b/B	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۱	۹	۱۵	-	۱۱	۱۱
u/B	۰/۵	۰/۲۵	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	-	۰/۵	۰/۵
h/B	-	-	۰/۵	-	-	-	-	-	۰/۵	-

جدول ۲- مشخصات خاک ماسه‌ای، مسلح‌کننده، پی در مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی

زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای ( $\phi$ )	۲۶/۸۲
وزن مخصوص ماسه (کیلونیوتن بر متر مکعب)	۱۵
ضریب زاویه اصطکاک خاک - مسلح‌کننده (Rinter)	۰/۹
چگالی دانه‌ها (Gs)	۲/۶۷
وزن مسلح‌کننده (گرم بر متر مربع)	۳۰۰
ضخامت مسلح‌کننده (میلی‌متر)	۱/۶
مقاومت کششی حداکثر مسلح‌کننده ژئوتکستایل و ژئوگرید (کیلونیوتن بر متر)	۵۵ و ۱۳
مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای E (کیلونیوتن بر متر مربع)	۸۰۰۰
سختی محوری ژئوتکستایل و ژئوگرید EA (کیلونیوتن بر متر)	۱۵۰۰ و ۱۰۰۰

### شبیه‌سازی عددی

با فرض نبود اصطکاک بین خاک و دیواره‌های محفظه و به فرض صلب بودن دیواره‌ها در مدل آزمایشگاهی، با ایجاد شرایط مرزی، یک گیرداری کامل در پایه هندسه و شرایط غلتک در کناره‌های عمودی ایجاد می‌شود. با فرض صلب بودن پی، نشست پی به وسیله کنگره یکنواخت در بالای لایه ماسه به جای مدل کردن خود پی شبیه‌سازی می‌شود که به ساده‌سازی محاسبات می‌انجامد. با توجه به تغییر موقعیت مسلح‌کننده‌ها، با تغییر مش‌بندی سعی شده است تا تأثیر مش‌بندی در مدل به کمترین حد برسد و از گزینه Prescribed displacement برای اعمال نشست به پی نواری استفاده شده است.

برای تحلیل عددی به روش اجزا محدود الگوهای به کار گرفته شده در این پژوهش، نرم‌افزار PLAXIS v8.2، با توجه به امکانات و ویژگی‌های خاص این نرم‌افزار، به کار گرفته شد. برای مدل خاک از مدل موهر-کولمب در حالت کرنش صفحه‌ای و برای دقت بیشتر از المان‌های ۱۵ گرهی برای مدل‌سازی استفاده شده است. برای مسلح‌کننده‌ها به صورت المان‌های Geogrid استفاده شد که قادر به تحمل خمش نیستند. همچنین، در هر دو سطح بالا و پایین مسلح‌کننده، زبری یکسان در نظر گرفته شد. برای بررسی و مقایسه، کلیه مشخصات حل عددی مشابه مدل آزمایشگاهی انتخاب شده است.

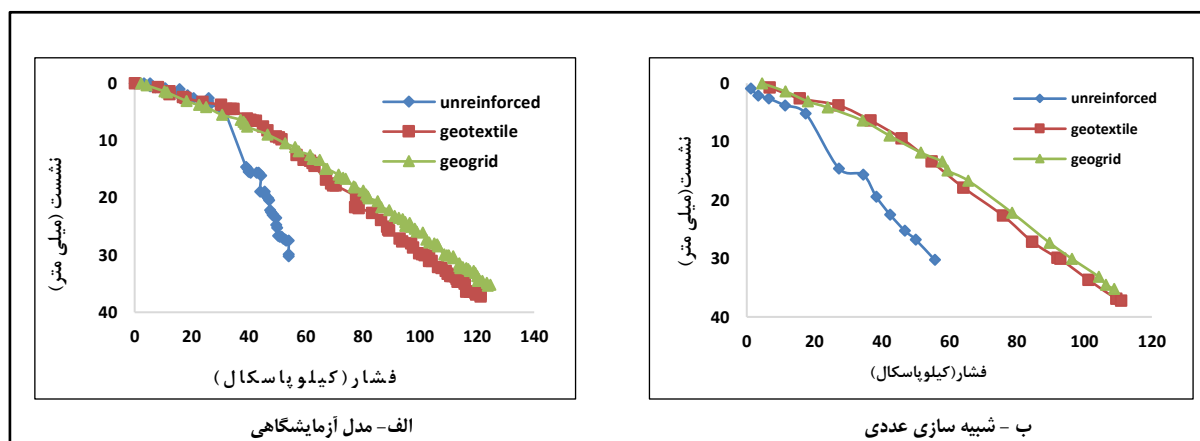
## نتایج و بحث

### تأثیر نوع مسلح‌کننده در ظرفیت باربری پی نواری در مدل فیزیکی و عددی

شکل ۴ الف نمودارهای فشار-نشست را برای پی نواری در خاک غیر مسلح و خاک مسلح‌شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید برای مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در آن فشار (q) بر حسب کیلوپاسکال و نشست (s) بر حسب میلی‌متر است.

در این تحقیق، دو نوع مسلح‌کننده (ژئوگرید و ژئوتکستایل) به کار گرفته شد. برای ژئوتکستایل، مقاومت

لغزش مستقیم بین خاک و ژئوتکستایل روی صفحه تماس اتفاق می‌افتد در حالی که مقاومت لغزش مستقیم برای ژئوگرید هم از طریق لغزش خاک روی خاک از بین شکاف‌های ژئوگرید و هم از طریق لغزش خاک روی خود ماده ژئوگرید به وجود می‌آید. بنابراین، مقاومت برشی به وجود آمده در آن به مراتب بیشتر از مقاومت برشی به وجود آمده در ژئوتکستایل است. شکل ۴ مقادیر نشست در برابر فشار اعمالی را برای دو نوع مسلح‌کننده ذکر شده و همچنین برای حالت غیر مسلح در عمق  $u=30$  میلی‌متر نشان می‌دهد.



شکل ۴ الف و ب- نمودار فشار - نشست برای مسلح‌کننده ژئوتکستایل و ژئوگرید و حالت غیر مسلح در مدل آزمایشگاهی و عددی

کیلوپاسکال، فونداسیون غیر مسلح به حالت گسیختگی رسیده و با افزایش فشار کم نشست‌های زیادی مشاهده می‌شود در صورتی که در حالت فونداسیون مسلح، هیچ گسیختگی ناگهانی تا تنش ۱۲۴ کیلوپاسکال برای مسلح‌کننده ژئوگرید و تا تنش ۱۲۱ کیلوپاسکال برای مسلح‌کننده ژئوتکستایل مشاهده نمی‌شود.

در منحنی مربوط به حالت غیر مسلح نیز با افزایش بار، نشست افزایش می‌یابد اما سطح گسیختگی در خاک به تدریج به سمت خارج توسعه می‌یابد و وقتی فشار اعمالی به ۳۶ کیلوپاسکال می‌رسد نشست پی همراه خواهد شد با پرش‌های ناگهانی. از این به بعد برای اینکه

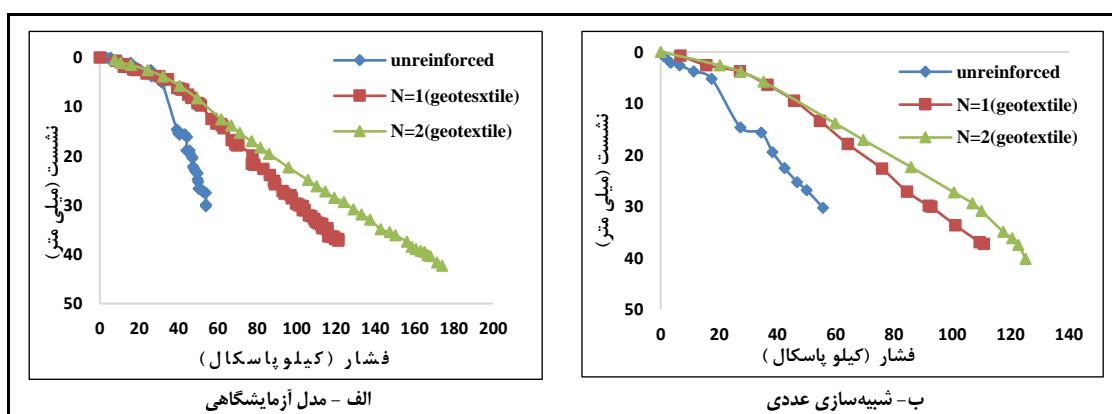
در شکل ۴-الف، منحنی مسلح‌کننده ژئوگرید تا فشار ۵۰ کیلوپاسکال پایین‌تر از منحنی مسلح‌کننده ژئوتکستایل قرار گرفته است و برای فشار اعمالی بالاتر از ۵۰ کیلوپاسکال، واکنش ژئوگرید بهتر از واکنش ژئوتکستایل است. طبق نظر گویدو و همکاران (Guido et al., 1986) در فشارهای کمتر، مسلح‌کننده‌های با مقاومت کششی کم، در مقایسه با مسلح‌کننده‌های با مقاومت کششی بالا، بهتر عمل می‌کنند. همچنین در این نمودار دو حالت مسلح‌شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید با حالت غیر مسلح نیز مقایسه شده و برتری حالت مسلح‌شده نسبت به حالت غیر مسلح نشان داده شده است. در فشار ۳۶

### تأثیر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده (N) در ظرفیت

#### باربری پی نواری در مدل فیزیکی و عددی

تأثیر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده در شکل ۵-الف و ب نشان داده شده است. شکل ۵-الف مربوط است به آزمایش‌هایی که در آن ۱ و ۲ لایه ژئوتکستایل و حالت بدون مسلح‌کننده در شرایط مشابه مقایسه شده‌اند. گفتنی است که فاصله بین لایه‌های ژئوتکستایل ۳۰ میلی‌متر است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، منحنی دو لایه ژئوتکستایل، نسبت به حالت یک لایه ژئوتکستایل، در فشار اعمالی یکسان نشست کمتری دارد. به نظر می‌رسد با افزایش تعداد لایه‌ها، فونداسیون خاکی مسلح‌شده منسجم‌تر شود و توده‌ای عظیم از خاک باید حرکت کند. بنابراین، عامل جلوگیری‌کننده جابه‌جایی خاک افزایش می‌یابد و به مراتب نشست کمتری اتفاق می‌افتد. شکل ۵-ب نتایج را برای مدل عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار هم دیده می‌شود منحنی دو لایه ژئوتکستایل نسبت به حالت یک لایه ژئوتکستایل در فشار اعمالی یکسان دارای نشست کمتری است.

سطح گسیختگی به سطح زمین توسعه یابد به نشست قابل توجهی نیاز خواهد بود. در این حالت، شیب نمودار فشار - نشست تقریباً تند می‌شود و نشانگر وجود گسیختگی برشی موضعی است. در نشست پی یکسان ۳۰ میلی‌متر، فشار حالت مسلح‌شده با ژئوگرید، ۱۱۰ کیلوپاسکال و برای حالت مسلح‌شده با ژئوتکستایل، ۱۰۱ کیلوپاسکال و برای حالت غیر مسلح ۵۴ کیلوپاسکال است. در فشار ۱۸ کیلوپاسکال، همان‌طور که از شکل ۴-ب برمی‌آید، فونداسیون غیر مسلح به حالت گسیختگی می‌رسد و با افزایش فشار کم نشست‌های زیادی مشاهده می‌شود در صورتی که در حالت فونداسیون مسلح، هیچ گسیختگی ناگهانی مشاهده نمی‌شود. در نشست پی یکسان ۳۰ میلی‌متر، فشار حالت مسلح‌شده با ژئوگرید، ژئوتکستایل، و برای حالت غیر مسلح به ترتیب ۹۶، ۹۲ و ۵۳ کیلوپاسکال است. بنابراین در هر دو حالت مدل‌سازی فیزیکی و عددی ژئوگرید بهتر از ژئوتکستایل و حالت مسلح بهتر از حالت غیر مسلح عمل می‌کند.



شکل ۵ الف و ب- نمودار فشار - نشست برای یک و دو لایه ژئوتکستایل در مدل آزمایشگاهی و عددی

نشان می‌دهد که روی بستر خاک ماسه‌ای برای مدل‌سازی فیزیکی و عددی قرار گرفته است. در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود که تا فشار ۷۰ کیلوپاسکال، منحنی دارای  $\frac{u}{B} = 1$  عملکرد بهتری، در مقایسه با دو مورد دیگر، نشان داده

### تأثیر عمق اولین لایه مسلح‌کننده (ii) در ظرفیت باربری پی نواری در مدل فیزیکی و عددی

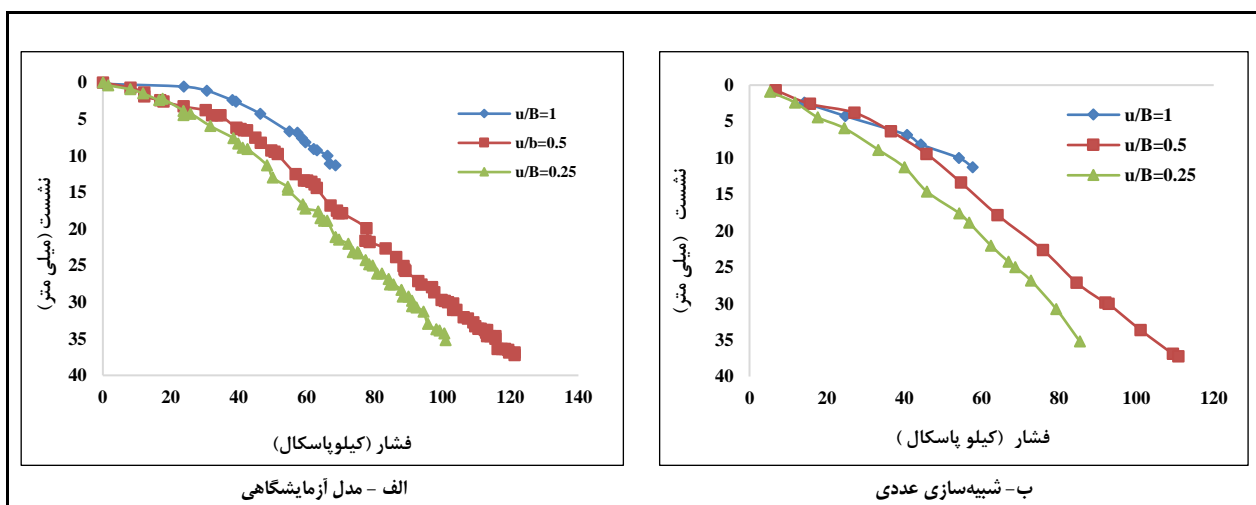
شکل ۶-الف و ب اختلاف مقادیر فشار - نشست را با تغییر در نسبت  $\frac{u}{B}$  برای یک لایه مسلح‌کننده ژئوتکستایل



اندازه‌گیری تغییر شکل خاک ماسه‌ای سست مسلح‌شده...

نمودار ۶- ب نتایج را برای مدل عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی دارای  $\frac{u}{B} = 1$  در تنش‌های بالا عملکرد بهتری، در مقایسه با دو مورد دیگر نشان داده است. منحنی دارای  $\frac{u}{B} = 0.5$  در فشار اعمالی پایین نشست کمتری، نسبت به دو مورد دیگر، دارد.

است. ولی بعد از این مقدار فشار، نتیجه بر عکس شده است و منحنی دارای  $\frac{u}{B} = 0.5$  در یک فشار اعمالی یکسان، نسبت به دو مورد دیگر، نشست کمتری دارد. عمق بحرانی منتج از نمودار شکل ۶ در فشارهای پایین منحنی دارای  $\frac{u}{B} = 0.5$  و در فشارهای بالا منحنی دارای  $\frac{u}{B} = 1$  است.

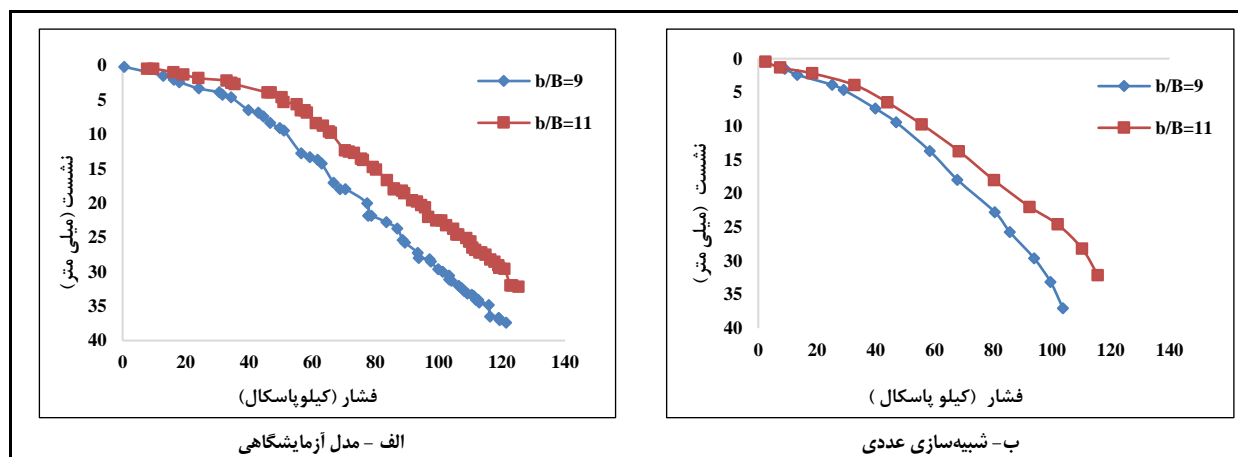


شکل ۶ الف و ب- نمودار فشار - نشست برای یک لایه ژئوتکستایل در  $u/B$ های مختلف در مدل آزمایشگاهی و عددی

مشاهده نمی‌شود ولی بعد از آن با افزایش نسبت  $b/B$ ، نشست کمتری در فشار اعمالی یکسان مشاهده می‌شود. به دلیل افزایش سطح تماس ماسه با مسلح‌کننده، نیروی اصطکاک و به تبع آن مقاومت برشی ایجاد شده افزایش می‌یابد و خاک عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. شکل ۷- ب، تأثیر پهناى مسلح‌کننده‌ها را در مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل برمی‌آید پهناى بیشتر مسلح‌کننده سبب افزایش ظرفیت باربری خاک می‌شود.

تأثیر پهناى مسلح‌کننده‌ها (b) در ظرفیت باربری پی نواری در مدل فیزیکی و عددی

شکل ۷- الف و ب فشار اعمالی در برابر نشست را برای نسبت‌های  $b/B$  برابر با ۱۱ و ۹ برای یک لایه مسلح‌کننده ژئوتکستایل که در عمق  $u=30$  میلی‌متر قرار گرفته روی بستر خاک ماسه‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۷- الف برمی‌آید، در نشست‌های پایین با افزایش نسبت  $b/B$ ، افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری



شکل ۷ - نمودار فشار - نشست برای یک لایه ژئوتکستایل در  $\frac{b}{B}$  های مختلف در مدل آزمایشگاهی و عددی

شکل ۸-ب تأثیر تعداد مسلح‌کننده در  $u/B=0.5$  را برای یک و دو لایه ژئوتکستایل نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل برمی‌آید، UBCR به‌طور میانگین تقریباً به  $2/27$  برابر در دو لایه و  $1/83$  برابر در یک لایه ژئوتکستایل رسیده است.

در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود که با تغییر نوع مسلح‌کننده در  $u/B=0.5$ ، UBCR به‌طور میانگین تقریباً به  $1/79$  برابر در ژئوگرید و  $1/7$  برابر در ژئوتکستایل رسیده است.

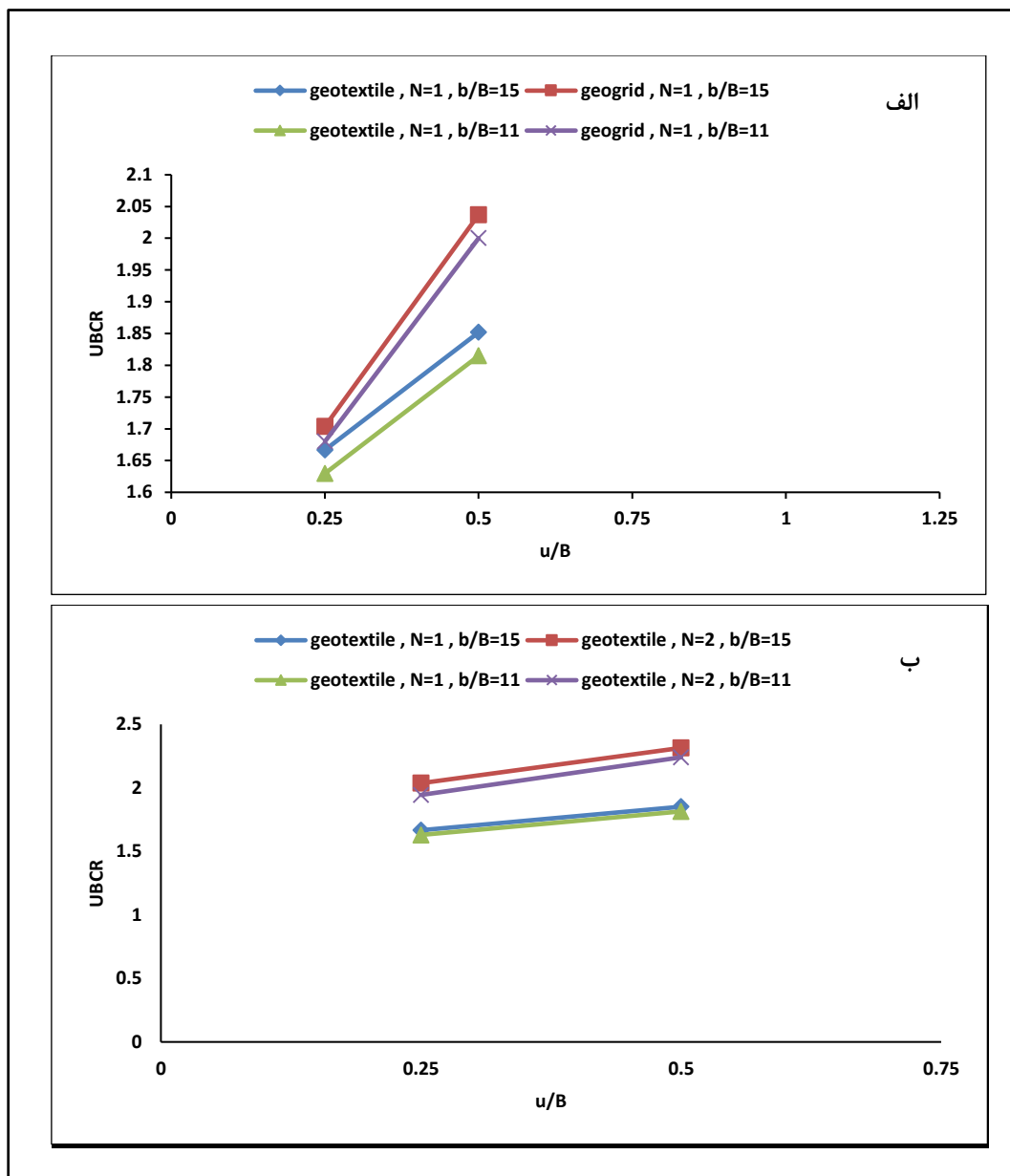
شکل ۹-ب تأثیر تعداد مسلح‌کننده در  $u/B=0.5$  را برای یک و دو لایه ژئوتکستایل نشان می‌دهد؛ از شکل برمی‌آید، UBCR به‌طور میانگین تقریباً به  $2/09$  برابر در دو لایه و  $1/71$  برابر در یک لایه ژئوتکستایل رسیده است.

تأثیر نوع و تعداد مسلح‌کننده در نسبت ظرفیت باربری پی نواری (UBCR) در مدل آزمایشگاهی و عددی

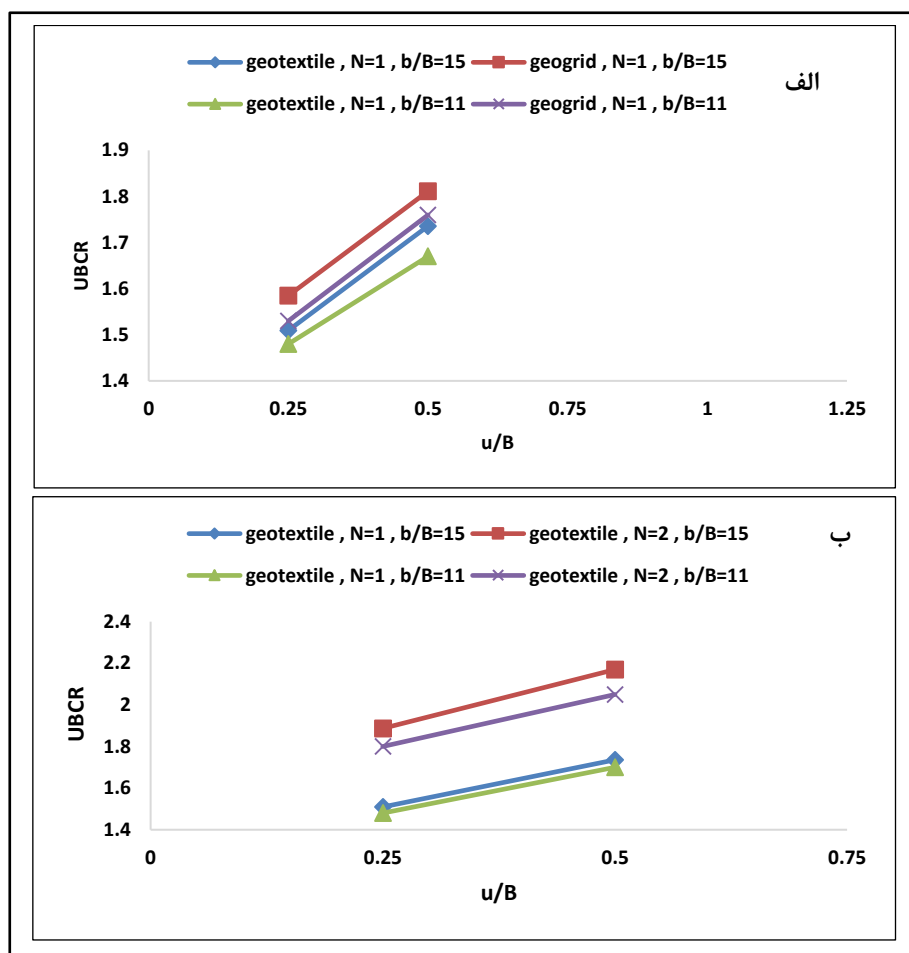
برای مقایسه ظرفیت باربری در حالت مسلح و غیر مسلح با همدیگر، از پارامتر  $(UBCR=qr/qu)$  استفاده شده است که در آن (UBCR)، نسبت ظرفیت باربری نهایی پی نواری در حالت مسلح (qr) به ظرفیت باربری نهایی پی نواری در حالت غیر مسلح (qu) است که هر دو ظرفیت باربری نهایی در نشست ثابت ۳۰ میلی‌متر قرائت شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، با تغییر نوع مسلح‌کننده در  $u/B=0.5$ ، UBCR به‌طور میانگین تقریباً به  $2/01$  برابر در ژئوگرید و  $1/83$  برابر در ژئوتکستایل رسیده است.

اندازه‌گیری تغییر شکل خاک ماسه‌ای سست مسلح‌شده...



شکل ۸ الف و ب - نمودار تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی نواری (UBCR) در مدل آزمایشگاهی



شکل ۹ الف و ب - نمودار تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی نواری (UBCR) در مدل عددی

### مکانیزم رفتار خاک

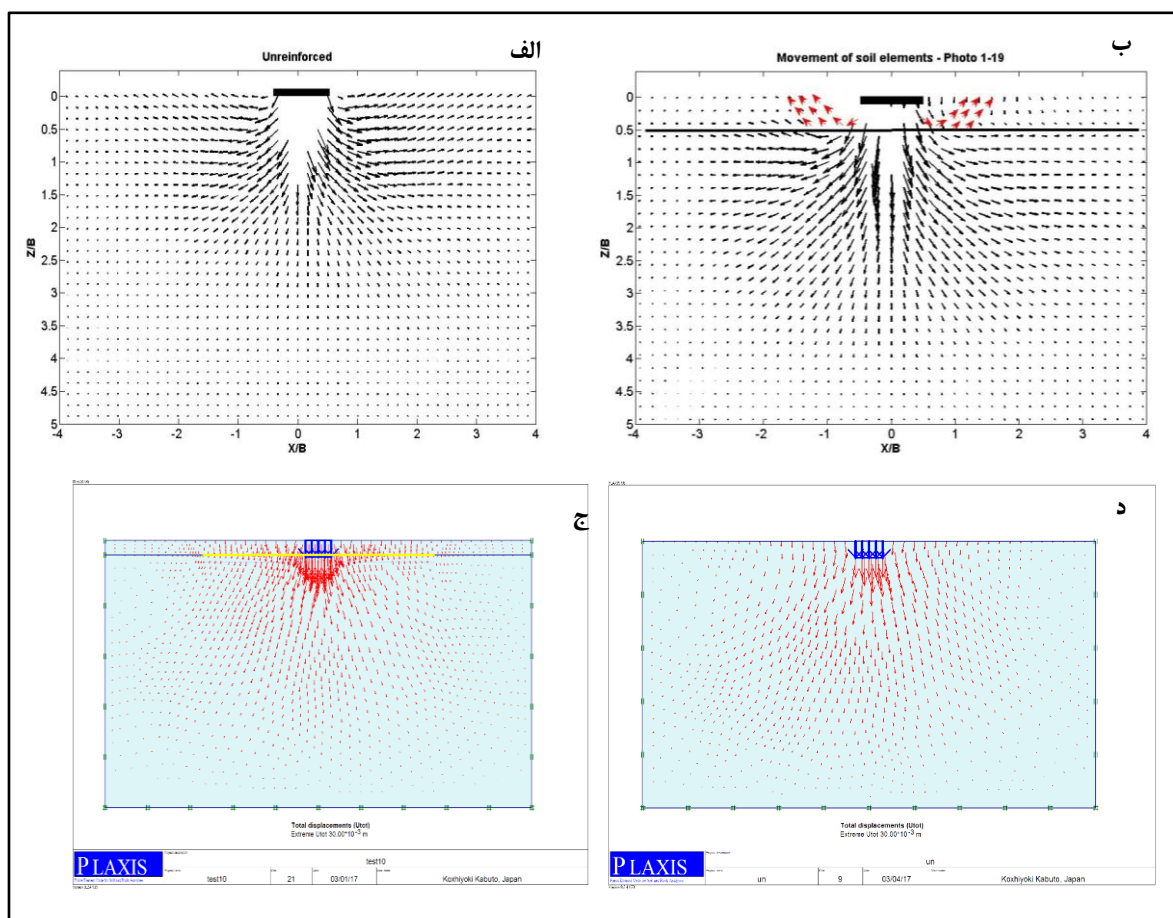
در حین آزمایش، یک تصویر دیجیتال از توده خاک گرفته شده است و با اعمال تغییر مکان معین در هر مرحله به پی نواری، تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک با عکس‌های متوالی ثبت و با استفاده از نرم‌افزار PIV پردازش شده است. شکل ۱۰ الف و ب، بردارهای جابه‌جایی به‌دست آمده از تحلیل برنامه PIV را در مرحله تشکیل کامل گوه گسیختگی در خاک غیر مسلح و مسلح‌شده با یک لایه ژئوتکستایل در نشست (S/B=۰/۵) نشان می‌دهد (S معرف نشست ۳۰ میلی‌متر است). با مقایسه این دو تصویر دیده می‌شود که گوه گسیختگی در حالت مسلح، نسبت به حالت غیر مسلح، هم در عمق و هم در عرض گسترش یافته است. در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود که ناحیه برش خورده درست از زیر پی و لبه

بیرونی آن شروع شده است. در شکل ۱۰-ب، گوه گسیختگی بلافاصله از زیر لایه مسلح‌کننده ژئوتکستایل شروع به تشکیل شدن کرده است. در بالای لایه مسلح‌کننده، زاویه بردارهای تغییر مکان با زاویه بردارهای زیر لایه مسلح‌کننده هم‌راستا نیستند. در بالای لایه ژئوتکستایل نیز سطوح گسیختگی موضعی به‌وجود آمده که با بردارهای قرمز رنگ نشان داده شده است. شکل‌های ۱۰-ج و د، بردارهای جابه‌جایی به‌دست آمده از تحلیل برنامه Plaxis را در خاک غیر مسلح و مسلح‌شده با یک لایه ژئوتکستایل در نشست (S/B=۰/۵) نشان می‌دهد. در شکل ۱۰-ج با افزایش عمق، تغییر جهت بردارها به سمت پایین و اندازه آنها کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰-د، مشاهده می‌شود که جهت بردارهای تغییر مکان در زیر لایه مسلح‌کننده به سمت پایین است. اندازه بردارها در این

اندازه‌گیری تغییر شکل خاک ماسه‌ای سست مسلح‌شده...

حالت مسلح، نسبت به حالت غیر مسلح، به روشنی دیده می‌شود. در این حالت، قسمت مسلح‌شده به صورت سازه کامپوزیت وزنی عمل می‌کند، بار ناشی از پی را به لایه‌های پایین‌تر و به منطقه خارج از گوه گسیختگی انتقال می‌دهد، و باعث افزایش ظرفیت باربری پی نواری می‌شود.

قسمت بزرگ‌تر است که این موضوع باعث تغییر شکل لایه مسلح‌کننده در زیر پی می‌شود. گوه گسیختگی بلافاصله از زیر لایه مسلح‌کننده ژئوتکستایل شروع به تشکیل شدن کرده است. در موارد تقویت شده سطوح گسیختگی تا زیر لایه مسلح‌کننده می‌رسند و به سطح زمین منتقل نمی‌شوند. همچنین، افزایش عمق و پهنای گسیختگی در



شکل ۱۰ - سطوح گسیختگی در خاک غیر مسلح و مسلح‌شده با یک لایه در نشست ( $S/B=0/5$ ) در مدل آزمایشگاهی و عددی

رفتاری برای به‌کارگیری مسلح‌کننده‌ها در خاک ماسه‌ای سست زیر پی نواری نتایج زیر را بیان کرد:  
- مدل عددی و آزمایشگاهی در این تحقیق نشان داد که به‌کارگیری مسلح‌کننده در خاک غیر مسلح تا حدود زیادی باعث افزایش ظرفیت باربری پی نواری شده است.

### نتیجه‌گیری

یک سری مدل آزمایشگاهی و عددی در این تحقیق به‌منظور مقایسه میزان ظرفیت باربری پی نواری روی خاک ماسه‌ای سست ساخته شد. با توجه به محدودیت، از لحاظ تأثیر ابعاد و پارامترهای مدل آزمایشگاهی ساخته شده بر نتایج به‌دست آمده، می‌توان از لحاظ کیفی و

منطبق نبودن کامل رفتار خاک ماسه‌ای و مسلح‌کننده بین مدل آزمایشگاهی و عددی، شرایط در نظر گرفته شده برای حالت Plane strain در مدل، تأثیر منفی اصطکاک جداره در مدل آزمایشگاهی (که سعی شد به کمترین مقدار رسانده شود)، اندرکنش بین پی و خاک و مسلح‌کننده‌ها، و نوع مدل عددی به کار رفته Mohr-coulomb باشد.

برای اینکه عملکرد دو مدل فیزیکی و عددی با یکدیگر مقایسه شود درصد خطای نسبی برای پارامتر فشار و برای تمامی آزمایش‌ها محاسبه شد. خطای نسبی هر چقدر کوچکتر باشد بیانگر مدل کامل‌تر و بهتری است. خطای نسبی طبق رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$(1) \quad \text{خطای نسبی} = \left| \frac{y_i - y_j}{y_i} \right|$$

درصد خطای نسبی برای آزمایش‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- مقدار درصد خطای نسبی

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
درصد خطای نسبی	۹	۱۵	۱۶	۱۵	۱۱	۱۱	۱۵	۱۲	۱۰	۱۱

رفته در آن نسبت به مصالح حقیقی رفتار یکسانی از خود نشان نخواهند داد، بنابراین برای دستیابی به نتایج دقیق، نیاز به آزمایش با اندازه بزرگ خواهد بود. در این پژوهش فقط رفتار خاک و مسلح‌کننده بررسی شد و تغییرات سختی مسلح‌کننده در آن بحث نگردید.

- برای خاک مسلح در عمق، سطح گسیختگی دارای گوه عمیق‌تر و با حجم بزرگ‌تر نسبت به حالت غیر مسلح (نظریه ظرفیت باربری پیشنهادی ترزاقی) است.

- نوع مناسب مسلح‌کننده برای ایجاد عملکرد بهتر و ایجاد مقدار بیشینه نسبت ظرفیت باربری، در مدل آزمایشگاهی و عددی، مسلح‌کننده ژئوگرید تعیین شد که به‌طور میانگین باعث شده است تا نسبت ظرفیت باربری در مدل آزمایشگاهی تقریباً ۲/۰۱ برابر و در مدل عددی ۱/۷۹ برابر شود.

- در این تحقیق افزایش تعداد مسلح‌کننده نیز موجب افزایش ظرفیت باربری پی گردید. به‌طور میانگین دو لایه مسلح‌کننده نسبت ظرفیت باربری را ۲/۲۷ برابر در مدل آزمایشگاهی و ۲/۰۹ برابر در مدل عددی نسبت به یک لایه مسلح‌کننده افزایش داد.

- بین نتایج عددی و آزمایشگاهی همخوانی مناسبی دیده می‌شود، ولی مدل عددی مقادیر کمتری نسبت به مدل آزمایشگاهی دارد که این تفاوت می‌تواند ناشی از

مقادیر فوق حاکمی از نزدیک بودن خطای مطلق (تفاوت مقادیر نتایج آزمایشگاهی و عددی) به مقدار واقعی (مقادیر نتایج آزمایشگاهی) است.

این تحقیق در یک مدل کوچک شده نسبت به مدل واقعی دنبال شده است و با توجه به اینکه مصالح به کار

## مراجع

- Adrian, R. J. 1991. Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23, 261-304.
- Guido, V. A., Chang, D. K. and Sweeney, M. A. 1986. Comparison of geogrid and geotextile reinforced earth slabs. *Can. Geotech. J.* 23, 435-440.

- Hajjalilue-Bonab, M., Katebi, H. and Behroz-Sarand, F. 2012. Behavior Investigation of Reinforced and Unreinforced Sand below Strip Foundation using PIV. *Civil Eng. J.* 23(2): 103-114. (in Persian)
- Huang, C. C. and Menq, F. Y. 1997. Deep footing and wide-slab effects on reinforced sandy ground. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE* 123 (1): 30-36.
- Jafari-Bari, M. 2005. Determination of elasticity shear modulus of the soil by using of Plaxis1 model. The case study (longitudinal cracking flood embankment in the Netherlands). *Appl. Res. Irrig. Drain. Struct. Eng.* 6(1): 41-52. (in Persian)
- Moghaddas-Tafreshi, S. N. and Dowson, A. R. 2010. Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement. *J. Geotext. Geomembranes.* 28(1): 72-84.
- Movahedan, M. 2012. Application and water leakage control of geomembrane linings in water reservoirs. *Appl. Res. Irrig. Drain. Struct. Eng.* 13(3): 15-28. (in Persian)
- Qiming, C. and Murad, A. F. 2015. Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation. 55(1): 74-85.
- Yamamoto, K. 1998. Failure mechanism of reinforced foundation ground and its bearing capacity analysis. Ph. D. Thesis. Kumamoto University, Japan.



## **Measurement of Deformation of Reinforced Loose Sandy Soil with Geosynthetics using Physical and Numerical Modeling**

**F. Ashkan\***

\* Corresponding Author: A Faculty Member, Maragheh University, Maragheh, Iran. Email: ashkan@maragheh.ac.ir  
Received: 8 April 2017, Accepted: 3 December 2017

Reinforced soil structures are a good choice for coastal walls, dam building, especially at the base of the side walls of the guard bridges, waterways and watercourse side walls, settling basins and irrigation networks and drainage services. In this study, reinforced soil system for increasing the bearing capacity of the soil under the foundation structure was used an experimental model was developed for studying the behavior of geosynthetically reinforced sandy soil. Displacement vectors of the soil and bearing capacity of the strip footing measured in the reinforced mode and unreinforced mode until the impact of variable parameters such as the type of reinforcement, the number of reinforcement layers, the first layer of depth and width of layers also was examined. In addition, numerical models, as well as an experimental model by using Plaxis software was developed and the results were compared with laboratory results. Generally it was observed that the reinforced geogrid as compared to reinforced and unreinforced geotextile soils offers more resistance to load and has more bearing capacity. Further with increasing the number and width of the layers, the above mentioned phenomenon can develop. The evaluation of sandy soil reinforcement and the performance of physical modeling using PIV and numerical Simulation using software Plaxis v8.2, suggested that the Size, of wedge failure in depth increases, and thus increases the bearing capacity of strip footing in reinforced state as compared to unreinforced state.

**Key Words:** Experimental Model (PIV) and Software Plaxis, Reinforced Sandy Soil, Strip Footing