



## مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای واقع بر سطح خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید

عبداله تبری<sup>۱</sup>، سعید ابریشمی<sup>۲\*</sup>، احسان سیدی حسینی‌نیا<sup>۳</sup>، نوید گنجیان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۵ تیر ۱۳۹۶

بازنگری: ۲۸ مرداد ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۸ شهریور ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۲۸ شهریور ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

آزمایش بارگذاری صفحه  
شالوده دایره‌ای  
ژئوگرید  
ظرفیت باربری  
نشست

**چکیده:** پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر مسلح‌سازی بر ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای واقع بر سطح خاک دانه‌ای صورت گرفته است. بدین منظور، جمعاً ۷ آزمایش بارگذاری صفحه بزرگ مقیاس بر روی صفحه دایره‌ای به قطر ۳۰۰ میلی‌متر انجام گرفته و جهت آماده‌سازی نمونه‌ها از سیستم بارش پرده‌ای متحرک که توسط ۶۰ آزمایش بارش کالیبره گردیده، استفاده شده است. در سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده، جهت اندازه‌گیری فشار زیر شالوده از روش جدیدی استفاده شده است. در کلیه آزمایش‌های بارگذاری روی خاک مسلح به ژئوگرید، فقط از یک لایه مسلح‌کننده استفاده شده و اثر عمق این لایه از کف شالوده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که استفاده از ژئوگرید، سبب افزایش ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای تا حدود ۱/۵۶ برابر حالت غیرمسلح می‌گردد. به علاوه، با افزایش عمق لایه ژئوگرید (نسبت  $u/D_F$ )، شیب نمودار بار-نشست (سختی پی) کاهش می‌یابد. به ازای مقادیر  $u/D_F > 0.67$ ، اثر این پارامتر (عمق بی‌بعد) بر ظرفیت باربری شالوده ثابت می‌گردد که این امر بیانگر تغییر مکانیزم عملکرد مسلح‌کننده و وقوع گسیختگی در توده خاک بالای لایه ژئوگرید است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از مرکز شالوده، مقادیر فشار نرمال وارد بر کف شالوده کاهش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

باربری زمین به گونه‌ای تعیین می‌شود که اولاً گسیختگی برشی در خاک رخ ندهد و ثانیاً نشست ایجاد شده از نشست مجاز بیشتر نگردد. تأمین باربری مورد نیاز، بخصوص با توجه به توسعه و پیشرفت‌های صورت گرفته در زندگی بشر، یکی از چالش‌های مهندسان ژئوتکنیک است که راهکارهای مختلفی برای آن ارائه شده است. یکی از تکنیک‌های موجود جهت بهسازی خاک که موجب افزایش باربری آن می‌شود، مسلح‌سازی خاک با المان‌های با قابلیت تحمل کشش است. اگر چه ابتدا مسلح‌سازی با المان‌های فلزی مطرح گردید، اما امروزه با توجه به نگرانی موجود در خصوص خوردگی فلزات، ترجیح به استفاده از مصالح ژئوستنتیک (نظیر ژئوگرید و ژئوسل) که مقاومت بالایی در برابر عوامل نامطلوب محیطی دارند، می‌باشد.

مروری کوتاه بر متون فنی پیشین بیانگر این واقعیت است که اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه باربری خاک مسلح، بر روی شالوده‌های نواری و مستطیلی [۱۰-۱]، مربعی [۱۵-۱۱] و حلقوی [۱۹-۱۶] کوچک مقیاس بوده است. این در حالی است که اولاً در سازه‌هایی مانند برج‌های خنک‌کننده، ایستگاه‌های رادار، مخازن ذخیره نفت، برج‌های تولیدین و چرخ و فلک شهرسازی‌ها مهندسان طراح ترجیح می‌دهند از شالوده دایره‌ای استفاده کنند و ثانیاً در آزمایش بارگذاری صفحه به عنوان یکی از روش‌های

تعیین باربری زمین، از صفحه دایره‌ای استفاده می‌شود.

اولین تحقیق در زمینه باربری خاک مسلح توسط بینکوئت و لی [۲۰] و صورت گرفت و گوئیدو و همکاران [۲۲] و [۲۳] برای اولین بار به بررسی همین مسأله در خاک مسلح به ژئوستنتیک‌ها پرداختند. پس از آن این مسأله توسط محققین بسیاری مورد مطالعه قرار گرفت. شین و همکاران [۲۴] برای اولین بار، نتایج چهار آزمایش بارگذاری صفحه دایره‌ای به قطر ۳۰۰ میلی‌متر روی خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید را گزارش نموده و افزایش سختی توده خاک به میزان ۵۴٪ را به دلیل وجود سه لایه ژئوگرید در مقایسه با حالت غیر مسلح، مشاهده نموده‌اند. دَش و همکاران [۲۵] با انجام آزمایش‌هایی بر روی شالوده دایره‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر واقع بر خاک مسلح به ژئوسل دریافتند که جهت دستیابی به کارایی حداکثر اثر تکنیک مسلح‌سازی، عرض و ارتفاع مسلح‌کننده ژئوسل باید بهینه شوند. بوشهریان و هاتف [۱۷] با انجام آزمایش‌هایی بر روی شالوده دایره‌ای به قطر تقریبی ۱۵۰ میلی‌متر، به این نتیجه دست یافتند که به ازای مقادیر  $u/D \geq 0.61$  (که  $u$  عمق اولین لایه مسلح‌کننده از کف شالوده و  $D$  قطر شالوده است)، تکنیک مسلح‌سازی اثر قابل توجهی بر ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای ندارد و برای  $N > 4$  (که  $N$  تعداد لایه‌های مسلح‌کننده است) کارایی روش، افزایش نمی‌یابد. سیتارام

1 Binquet & Lee

2 Guido et al.

3 Dash et al.

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.abrishami@um.ac.ir

ژئوگرید از کف شالوده روی کارائی تکنیک مسلح‌سازی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور نتایج آزمایش‌ها در قالب نمودارهای بار-نشست و فشار نقاط مشخصی از کف شالوده در برابر نشست ارائه شده است.

## ۲- سیستم آزمایشگاهی

### ۲-۱- مدل شالوده

چنان‌که پیش‌تر اشاره شد، با توجه به اینکه اکثر شالوده‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین به صورت نواری، مربعی یا مستطیلی بوده‌اند، عملکرد و رفتار شالوده سطحی دایره‌ای تاکنون کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی، شرایط شالوده دایره‌ای به دلیل تقارن محوری، به صورت دو بعدی می‌باشد که امکان تحلیل‌ها و تفسیرهای بعدی را آسان‌تر می‌سازد. بنابراین مدل شالوده پژوهش حاضر به صورت دایره‌ای انتخاب، طراحی و ساخته شده است.

جهت اندازه‌گیری و تعیین توزیع فشار زیر شالوده، از سیستم جدیدی استفاده شده که در شکل ۱ تصاویر و نقشه فنی اجزاء مختلف مجموعه مدل شالوده دایره‌ای طراحی و ساخته شده ارائه گردیده است. این سیستم دارای دو صفحه دایره‌ای شکل فوقانی و تحتانی بوده که بین آن‌ها سه عدد نیروسنج طوری طراحی و تعبیه شده که بتوانند فشار زیر شالوده را در فواصل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متری از مرکز شالوده اندازه‌گیری نمایند. به منظور اتصال و انتقال بار، بین صفحات فوقانی و تحتانی از پنج عدد پایه استفاده شده است. مطابق مطالعات پیشین، کف مجموعه مدل شالوده تحقیق حاضر با چسباندن یک لایه بسیار نازک مصالح ماسه‌ای توسط چسب اپوکسی کاملاً زیر گردیده است. همچنین جهت سهولت حمل و نقل مجموعه حاضر و سبک بودن آن از آلومینیوم (آلیاژ ۷۰۰۰) برای ساخت آن استفاده شده است که مرغوب‌ترین نوع آلومینیوم موجود در بازار می‌باشد.

بر اساس توصیه استاندارد ASTM D 1194 [۳۲] لازم است قطر صفحه بارگذاری حداقل ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت صفحه حداقل ۲۵ میلی‌متر باشد. لذا در این تحقیق، قطر صفحات بالایی و پایینی ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت هر صفحه جهت اطمینان از صلبیت شالوده، ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. علاوه بر رعایت توصیه ذکر شده، به منظور کنترل میزان سختی شالوده حاضر از رابطه ناصری و سیدی حسینی‌نیا [۳۳] نیز استفاده شده است:

$$K_F = \frac{E_F}{E_S} \left( \frac{t}{r_0} \right)^3 (1 - n^2)^{-1.5} \quad (1)$$

و سیرش<sup>۱</sup> [۲۶ و ۲۷] ضمن مطالعه رفتار خاک‌های ماسه‌ای و رسی مسلح به ژئوگرید و ژئوگریدسل، کرنش لایه مسلح‌کننده و فشار نرمال در عمق را مطالعه نمودند. نتایج ایشان نشان داد مقدار فشار نرمال در حالت نهائی، در محور تقارن و در عمق  $D/8.5$  از کف شالوده، برای خاک غیرمسلح، حدود  $q/1.5$  (که  $q$  فشار متوسط زیر شالوده است) و برای خاک مسلح، حدود  $q/2.5$  می‌باشد. مقدار فشار در شرایط مشابه و برای فواصل افقی  $D/5$  و  $D$  از محور تقارن، برای خاک غیر مسلح، به ترتیب  $q/0.8$  و صفر و برای خاک مسلح، به ترتیب  $q/2.0$  و  $q/1.2$  می‌باشد. در نتیجه، استفاده از مسلح‌کننده باعث یکنواخت‌تر شدن توزیع فشار شده است.

باسودهار و همکاران<sup>۲</sup> [۲۸] به بررسی اثر تکنیک مسلح‌سازی توسط ژئوتکستایل بر ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای (قطر متغیر از ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر) پرداختند و دریافتند با افزایش تعداد لایه‌های ژئوتکستایل، ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای به طور قابل توجهی افزایش و نشست شالوده با نرخ کمی کاهش می‌یابد. سیرش و همکاران<sup>۳</sup> [۲۹] با انجام آزمایش‌های متعددی روی شالوده دایره‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر، به بررسی اثرات استفاده از ژئوسل به عنوان مسلح‌کننده در لایه ماسه واقع بر سطح لایه رس دارای حفره پرداختند. لواسان و قضاوی [۳۰] به بررسی اثر تداخل بر ظرفیت باربری و نشست شالوده‌های دایره‌ای به قطر ۴۰۰ میلی‌متر واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح به ژئوگرید پرداختند و دریافتند با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید، اثر تداخل شالوده دایره‌ای بر نشست آن کاهش می‌یابد. دمیر و همکاران<sup>۴</sup> [۳۱] به بررسی ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای به قطر ۳۰۰ میلی‌متر واقع بر خاکریز دانه‌ای مسلح به ژئوگرید ساخته شده بر روی لایه رُس طبیعی پرداختند. نتایج مجموعه تحقیقات صورت گرفته بیانگر این است که اولاً نیروی کششی ایجاد شده در ژئوگرید در اثر نشست شالوده باعث افزایش فشار همه جانبه در خاک می‌شود و ثانیاً مسلح‌سازی سبب می‌شود خاک زیر شالوده همانند یک دال صلب رفتار کرده و عملاً فشار به لایه‌های پائین‌تر منتقل شود و در نتیجه، باربری افزایش یابد.

با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی اندک صورت گرفته روی عملکرد شالوده‌های دایره‌ای خصوصاً با ابعاد بزرگ، تفاوت‌های رفتار شالوده‌های کوچک و بزرگ مقیاس، ابهامات موجود در زمینه کارائی مسلح‌سازی خاک در افزایش سختی و باربری توده زمین و اعتبار آزمایش بارگذاری صفحه در ارزیابی عملکرد شالوده‌ها، در این تحقیق با هدف مطالعه اثر مسلح‌سازی بر باربری توده خاک ماسه‌ای با انجام آزمایش بارگذاری صفحه دایره‌ای، یک سیستم آزمایشگاهی توسعه یافته‌ای طراحی و ساخته شده است. بنابراین ابتدا به ارائه و تشریح جزئیات سیستم آزمایشگاهی توسعه یافته پرداخته شده و پس از اطمینان از صحت و دقت عملکرد سیستم ساخته شده، هفت آزمایش بارگذاری شالوده دایره‌ای انجام گرفته تا اثر عمق قرارگیری لایه

1 Sireesh& Sitharam

2 Basudhar et al.

3 Sireesh et al.

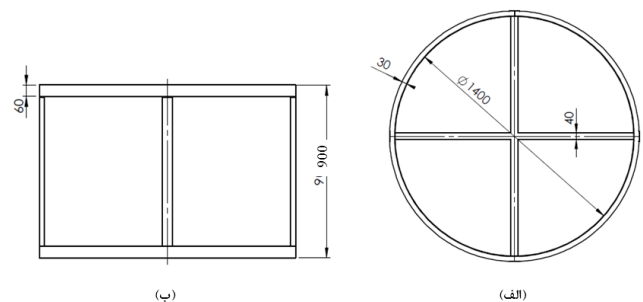
4 Demir et al.



## ۲-۲- مخزن آزمایش

شکل مخزن خاک باید متناسب با شکل مدل شالوده باشد و لذا به صورت استوانه‌ای انتخاب شده است. اما ابعاد مخزن متناسب با ابعاد شالوده، باید آن قدر بزرگ باشد که نتیجه آزمایش را متأثر نسازد. از طرفی، افزایش ابعاد مخزن، انرژی و زمان لازم برای پر و خالی کردن و هزینه‌های ساخت آن را افزایش خواهد داد. لذا جهت دستیابی به ابعاد بهینه مخزن آزمایش (شامل قطر و ارتفاع) با توجه به حوزه تأثیر مسأله، تحلیل‌های عددی به کمک مدل استاتیکی آریافر و همکاران [۳۶] با نرم‌افزار PLAXIS 2D صورت گرفته است. نتایج نشان‌دهنده کاهش باربری شالوده مورد نظر با افزایش قطر و ارتفاع مخزن، به ترتیب تا مقادیر ۱۲۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و ثابت شدن مقدار باربری به ازاء مقادیر بزرگ‌تر قطر و ارتفاع است. لذا جهت اطمینان، مخزن استوانه‌ای با ابعاد داخلی قطر ۱۴۰۰ و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شده است. لازم به ذکر است که در متون فنی اشاره مستقیمی به اثر قطر (یا طول) مخزن خاک بر باربری شالوده نشده است. ولی مطالعات آزمایشگاهی پیفل و داس<sup>۱</sup> [۳۷] بر روی شالوده واقع بر خاک غیرمسلح نشان داده که اگر عمق لایه صلب (کف مخزن) از کف شالوده بیش از دو برابر عرض شالوده باشد، تأثیری بر ظرفیت باربری شالوده ندارد.

در شکل ۲ جزئیات شکل مخزن آزمایش طراحی و ساخته شده نشان داده شده است. با توجه به فشارهای پیش‌بینی شده روی دیواره و کف مخزن و جهت دستیابی به شرایط مخزن صلب، دیواره مخزن از ورق فولادی با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر و کف مخزن از ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر ساخته شده و از مقاطع قوطی شکل در وجه بیرونی و لبه فوقانی دیواره، محل تماس ورق دیواره به ورق کف و در وجه بیرونی کف به عنوان سخت‌کننده استفاده شده است. جهت تسهیل عملیات تخلیه خاک از مخزن، دو دریچه مربعی به ابعاد ۲۵۰ میلی‌متر در قسمت پایینی دیواره مخزن تعبیه گردیده است. همچنین جهت کاهش اثر اصطکاک وجوه داخلی دیواره‌های مخزن، این وجوه تا حد امکان صاف و صیقلی شده‌اند.

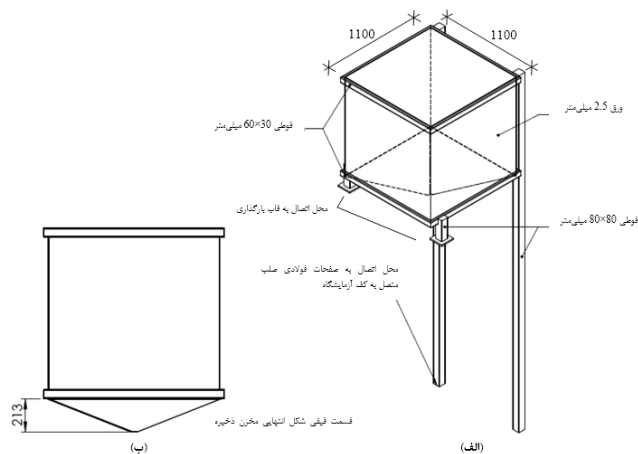


شکل ۲: جزئیات مخزن آزمایش؛ (الف) پلان کف و (ب) نمای جانبی  
Fig. 2. Details of testing tank; (a) bottom plan, and (b) side view

## ۲-۳- سیستم بارش پرده‌ای متحرک<sup>۲</sup>

یکی از مهم‌ترین مراحل مدلسازی فیزیکی، آماده‌سازی نمونه می‌باشد. روش‌های مختلفی برای ساخت نمونه خاک وجود دارد که با توجه به انتخاب ماسه به عنوان مصالح خاکی در تحقیق حاضر، می‌توان از ارتعاش، تراکم (به صورت خشک یا مرطوب) و بارش (در هوا یا در آب) استفاده نمود [۳۸]. با توجه به مزایا، معایب و کاربردهای روش‌های مختلف و با هدف حصول دانسیته مشخص، تکرارپذیری شرایط ساخت نمونه و تسهیل و تسریع نمونه‌سازی و با در نظر گرفتن اهداف این پژوهش، روش بارش در هوا (بارش ماسه) جهت ساخت مدل زمین انتخاب گردیده و سیستم بارش پرده‌ای متحرک جهت ایجاد طیف وسیعی از دانسیته با توجه به تغییرات ارتفاع و شدت بارش، طراحی و ساخته شده است [۳۹]. این سیستم از پنج بخش اصلی مخزن ثابت ذخیره ماسه، لوله انعطاف‌پذیر (شلنگ)، قیف متحرک ماسه، لوله صلب و بارشگر پرده‌ای با ضخامت پرده مختلف، تشکیل شده است.

در شکل ۳ مشخصات دیواره و مقاطع به کار رفته در ساخت مخزن ذخیره خاک نشان داده شده است. با توجه به حجم بالای خاک مورد نیاز جهت بارش، مخزن ذخیره مکعبی شکلی با ابعاد داخلی ۱۱۰۰ میلی‌متر یعنی حجمی کمی بیشتر از نمونه، طراحی و ساخته شده است. به منظور تسهیل حرکت ذرات ماسه به صورت پیوسته و جلوگیری از انسداد و انباشته شدن ذرات در کف مخزن ذخیره، قسمت تحتانی آن به صورت شیب‌دار (قیفی شکل) در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: مخزن ذخیره خاک سیستم بارش؛ (الف) تصویر سه بعدی به همراه ستون‌های طراحی شده جهت اتصال به کف صلب آزمایشگاه و قاب بارگذاری و (ب) نمای جانبی

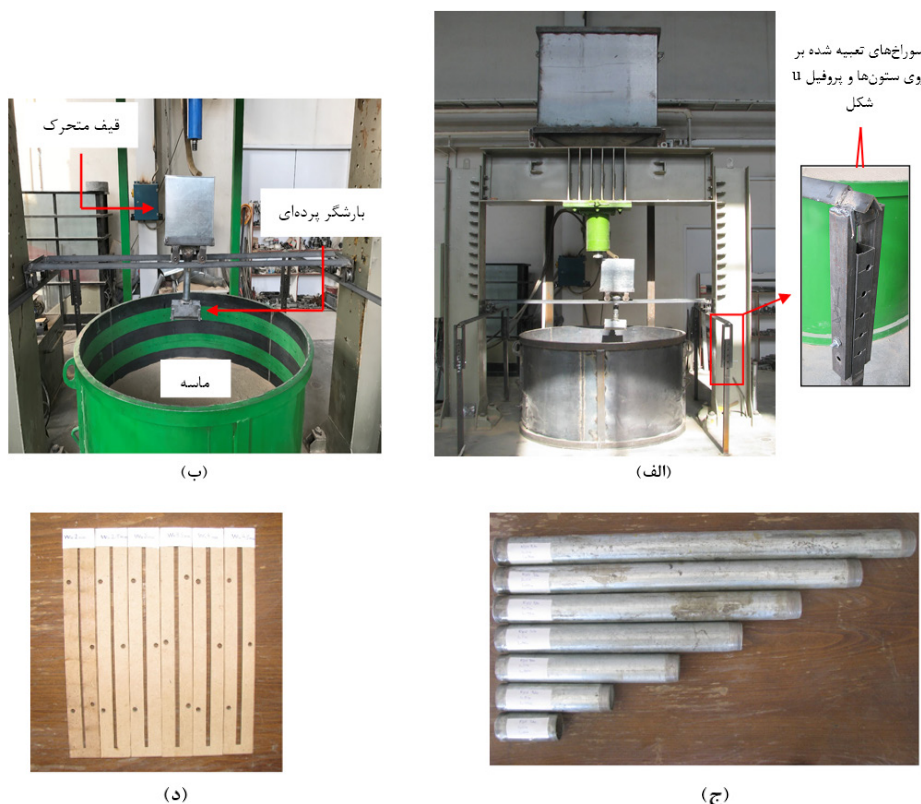
Fig. 3. Soil storage tank of the raining system; (a) 3D view showing the designed columns for connection to the rigid base of the lab and the loading frame, and (b) side view



متصل شده‌اند. به کمک این سیستم، قیف متحرک ماسه قادر است در دو جهت عمود بر هم حرکت کند و سطحی مربعی به ابعاد ۲۰۰۰ میلی‌متر (سطحی بزرگتر از مخزن اصلی خاک) را کامل پوشش دهد. همچنین، به منظور جابجایی قائم مجموعه و تنظیم ارتفاع بارش، در چهار طرف ستون‌ها سوراخ‌هایی با فاصله قائم ۵۰ میلی‌متر ایجاد شده تا به توان با تغییر محل اتصال تیرها به ستون‌ها، ارتفاع مجموعه را در هر مرحله تنظیم کرد. زیر قیف متحرک، لوله صلبی جهت انتقال ماسه به بارشگر پرده‌ای قرار داده شده است. با توجه به محدودیت تغییر ارتفاع بوسیله ستون‌ها، لوله صلب در طول‌های مختلف ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر ساخته شده تا بتوان ارتفاع بارش را به میزان مورد نظر تنظیم کرد. بارشگر پرده‌ای که به انتهای لوله صلب متصل شده، جهت ایجاد پرده بارشی با طول ۲۰۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شده است. جهت کنترل شدت بارش، عرض پرده بارش (عرض بازشو) متغیر و برابر ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴ و ۴/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

در شکل ۴ تصاویر کلی سیستم بارش پرده‌ای متحرک و اجزاء آن نشان داده شده است. لوله انعطاف‌پذیر (شلنگ) وظیفه انتقال ماسه از مخزن ذخیره به قیف متحرک را بر عهده دارد. کاهش قطر لوله، باعث کاهش سرعت انتقال ذرات می‌شود که نتیجه آن انسداد لوله انعطاف‌پذیر و پر نشدن قیف متحرک است و افزایش قطر، لوله را سنگین و عملیات را دشوار می‌سازد. لذا جهت دستیابی به قطر بهینه متناسب با دانه‌بندی خاک مورد استفاده و شدت جریان بارش، لوله‌هایی با قطرهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند و نهایتاً لوله انعطاف‌پذیر با قطر ۴۵ میلی‌متر انتخاب گردید.

قیف متحرک ماسه، یک مخزن صلب از جنس آلومینیوم (جهت سبک بودن) به ابعاد ۳۰۰×۲۰۰×۳۰۰ میلی‌متر (طول×عرض×ارتفاع) است که بر روی یک چهارپایه فلزی قرار گرفته و توسط سیستم چرخ و ریل بر روی دو تیر فولادی از پروفیل نبشی به راحتی حرکت می‌کند. این مجموعه نیز توسط سیستم چرخ و ریل بر روی دو تیر فولادی دیگر با پروفیل نبشی حرکت می‌کند که دو تیر فولادی اخیر، با چهار ستون به کف آزمایشگاه



شکل ۴: سیستم بارش پرده‌ای متحرک؛ (الف) نمای مقابل، (ب) نما با جزئیات بیشتر، (ج) لوله‌های صلب با طول‌های مختلف و (د) بازشو با عرض‌های مختلف

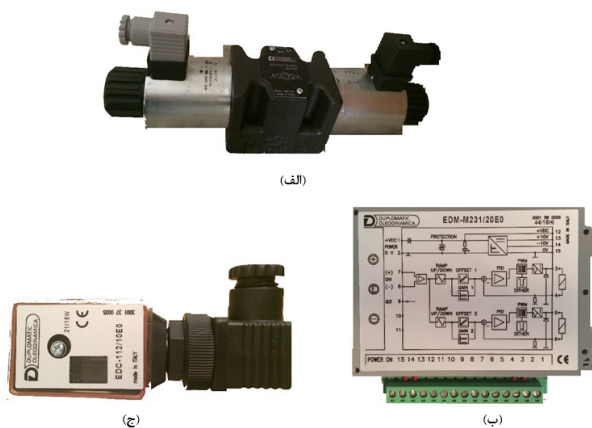
Fig. 4. Portable curtain rain system; (a) front view, (b) a view with more details, (c) rigid pipes with different lengths, and (d) rainers with different opening widths

شده، تعیین گردیده که نتایج در شکل ۵ ارائه شده‌اند. نتایج نشان دادند که حاصل سیستم بارش، نمونه‌ای همگن بوده که دانسیته مصالح باریده شده

جهت ارزیابی عملکرد سیستم بارش، ۶۰ آزمایش انجام گرفته و دانسیته به کمک ظروف فلزی صلبی که در ترازهای مختلف مخزن خاک جاسازی

پروپرشنال و محرک‌های<sup>۱</sup> جریان و فشار (شکل ۶)، سیلندر روغن و شفت الحاقی می‌باشد که محرک‌ها، رابط بین بخش مکانیکی و الکتریکی سیستم می‌باشند.

بخش الکتریکی سیستم (واحد کنترل کننده)، شامل تابلو برق، کارت A/D، کامپیوتر و نرم‌افزار است. کامپیوتر به کمک نرم‌افزار طراحی شده با زبان برنامه‌نویسی C، ابتدا دستور بارگذاری مورد نظر کاربر را دریافت می‌کند. سپس با توجه به مشخصات بخش مکانیکی سیستم، فرمان لازم را صادر می‌کند. فرمان از طریق کارت A/D به محرک‌های شیر پروپرشنال منتقل می‌شود و بلافاصله نتیجه در قالب اطلاعات مربوط به جریان و فشار (از طریق سنسورهای موجود در شیر پروپرشنال) و نیروی وارده به شالوده (از طریق نیروسنج بین شفت الحاقی و مدل شالوده) از طریق کارت A/D توسط کامپیوتر قرائت می‌شود تا نرم‌افزار با توجه به نتیجه کار و بارگذاری مورد نظر کاربر، پردازش لازم را انجام داده و دستور مناسب جدیدی ارسال نماید. بدین ترتیب، حلقه بسته‌ای بین بخش مکانیکی و الکتریکی جهت اعمال بار تشکیل می‌شود.



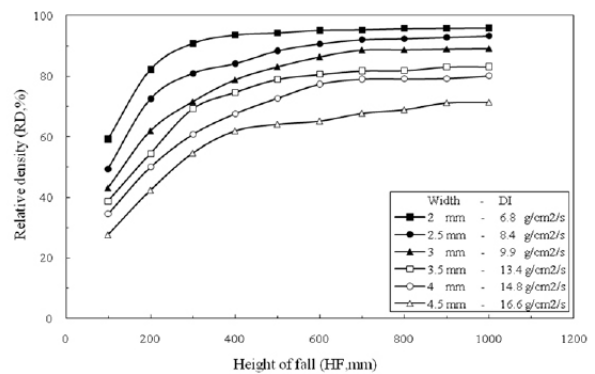
شکل ۶: شیر کنترل جهت پروپرشنال به همراه محرک‌های آن؛ (الف) شیر دو سرسولنوییدی کنترل جهت پروپرشنال، (ب) محرک جریان و (ج) محرک فشار

Fig. 6. Proportional directional valve with drivers; (a) solenoid operated proportional directional control valve, (b) flow driver, and (c) pressure driver

#### ۲-۵- سیستم قرائت و ثبت اطلاعات

این سیستم شامل مجموعه‌ای از ابزار دقیق، کامپیوتر، نرم‌افزار و کارت A/D با ۱۶ کانال، به عنوان واسط بین ابزار و کامپیوتر است. کارت موجود قادر است از هر کانال ۱۰۰ داده را در هر ثانیه قرائت کند. این سیستم سیگنال‌های خروجی از مبدل‌های مختلف (ابزار دقیق) را که به صورت پیوسته است، دریافت و به سیگنال‌های غیرپیوسته تبدیل می‌کند. نرم‌افزار با توجه به ضرائب کالیبراسیون و به کمک کامپیوتر، سیگنال‌های غیرپیوسته

متناسب با ضخامت پرده بارش (ابعاد بازشو) و ارتفاع بارش است. بدین ترتیب که برای یک ضخامت پرده بارش مشخص (شدت بارش معین)، با افزایش ارتفاع بارش (HF) تا ۶۰۰ میلی‌متر، دانسیته نسبی خاک افزایش می‌یابد ولی برای  $HF \leq 600 \text{ mm}$ ، تغییر ارتفاع بارش اثر چندانی بر دانسیته نسبی نمونه‌های باریده شده ندارد، اما دانسیته نسبی همواره با افزایش شدت بارش (DI)، افزایش می‌یابد. سیستم بارش پرده‌ای متحرک حاضر قادر به تهیه نمونه‌هایی با دانسیته نسبی از ۲۷/۶ تا ۹۵/۸ درصد است. جهت دستیابی به دانسیته نسبی  $RD = 55\%$  یعنی تراکم متوسط براساس طبقه بندی صورت گرفته در مرجع [۴۰]، در کلیه آزمایش‌های پژوهش حاضر از پرده بارش با ضخامت ۴/۵ میلی‌متر استفاده شده و مطابق شکل ۵، ارتفاع بارش برابر ۳۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است ماسه در لایه‌هایی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر در مخزن آزمایش باریده شده است.



شکل ۵: اثر ارتفاع بارش (HF) و شدت بارش (DI) بر دانسیته نسبی نمونه (RD)

Fig. 5. Effect of height of fall (HF) and deposition intensity (DI) on the relative density (RD) of the sample

#### ۲-۴- سیستم بارگذاری

در تحقیق حاضر، جهت تولید و اعمال نیرو با هزینه کم و دقت زیاد از سیستم الکترومکانیکی استفاده شده که بخش مکانیکی آن با روغن تحت فشار یعنی به صورت هیدرولیکی کار می‌کند. از جمله مزایای سیستم‌های هیدرولیکی نسبت به سایر سیستم‌های مکانیکی یا الکتریکی تولید و اعمال قدرت، می‌توان به طراحی ساده و نصب آسان قطعات، هزینه کم در عین دقت بالا، امکان تولید و انتقال نیروهای بزرگ (بیش از چند تن)، عمر بالای قطعات بکار رفته بدلیل استفاده از روغن در داخل مجموعه و کاهش میزان فرسایش، امکان دستیابی به نیرو، فشار، گشتاور و سرعت‌های غیرپله‌ای، امکان تعویض جهت حرکت با سرعت زیاد و امکان اتوماسیون کامل اشاره کرد.

بخش مکانیکی سیستم بارگذاری شامل مخزن روغن، پمپ هیدرولیک، سیستم محرک پمپ (الکتروموتور)، شیر فشارشکن (رگلاتور)، شیر هیدرولیک

با استاندارد ASTM D854 [۴۳] و تعیین دانسیته نسبی (مطابق با استاندارد ASTM D4254 [۴۴]) بر روی ماسه مورد نظر انجام گردیده که منحنی توزیع دانه‌بندی و سایر پارامترهای فیزیکی خاک به ترتیب در شکل ۷ و جدول ۱ ارائه شده‌اند. مطابق نتایج بدست آمده و براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (ASTM D2487 [۴۵])، مصالح خاکی مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع ماسه متوسط بدانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. لازم به ذکر است که جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی مصالح خاکی سه آزمایش برش مستقیم روی نمونه با ابعاد  $36 \times 10 \times 10$  میلی‌متر با فشارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال مطابق با استاندارد ASTM D3080 [۴۶] صورت گرفته که بر این اساس مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ماسه مورد نظر به ترتیب صفر و ۳۲ درجه تعیین شده است.

### ۳-۲- مصالح مسلح کننده

مسلح کننده مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع ژئوگرید می‌باشد. از جمله مزایای ژئوگرید می‌توان به سادگی در طراحی، سبک بودن، قابل حمل بودن، در دسترس بودن و عملکرد مناسب آن در بهسازی رفتار خاک اشاره کرد. ژئوگرید مورد استفاده در پژوهش حاضر محصول شرکت «مش ایران» است که با نام تجاری B و تحت لیسانس و نظارت شرکت نتلون انگلستان تولید می‌شود. مشخصات کامل ژئوگرید مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۲ ارائه شده است.

دریافت شده از کارت A/D را به داده‌های معنادار (عدد) تبدیل و در فایل‌های مربوطه ثبت می‌کند. ابزار دقیق به کار رفته شامل یک نیروسنج برای اندازه‌گیری نیروی وارد به شالوده، سه نیروسنج برای اندازه‌گیری فشار زیر شالوده و سه LVDT برای اندازه‌گیری نشست و کج‌شدگی احتمالی شالوده می‌باشد.

### ۳-۳- مصالح

مصالح مورد استفاده جهت انجام پژوهش حاضر، شامل مصالح خاکی و مسلح کننده می‌باشند.

### ۳-۱- مصالح خاکی

به منظور تسهیل تفسیر نتایج بدست آمده، کنترل دقیق پارامترهای مؤثر بر نتایج آزمایش و دستیابی به سرعت و تکرارپذیری بالا در ساخت نمونه و با توجه به روش انتخابی برای ساخت نمونه (بارش در هوا)، از مصالح ماسه‌ای خشک و فاقد ریزدانه با دانه‌بندی یکنواخت در تحقیق حاضر استفاده گردیده است. این مصالح از سنگ سیلیس طبیعی معدن فیروزکوه بدست آمده و به واسطه طبیعی بودن، ذرات آن غالباً گرد گوشه می‌باشند. مجموعه آزمایش‌هایی جهت تعیین پارامترهای فیزیکی مصالح مانند آزمایش دانه‌بندی (مطابق با استاندارد ASTM D422 [۴۱])، تعیین درصد رطوبت (مطابق با استاندارد ASTM D2216 [۴۲])، تعیین توده ویژه (مطابق

### جدول ۱: مشخصات مصالح خاکی

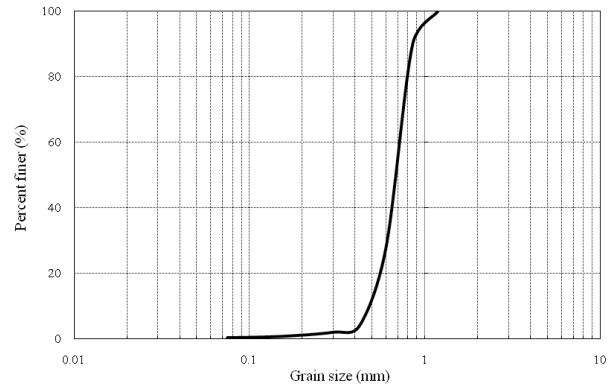
Table 1. Soil properties

ردیف	پارامتر	نماد	واحد	مقدار
۱	اندازه مؤثر دانه‌ها	$D_{10}$	mm	۰/۴۸
۲	اندازه متوسط دانه‌ها	$D_{50}$	mm	۰/۶۸
۳	ضریب یکنواختی منحنی دانه‌بندی	$C_u$	-	۱/۵۰
۴	ضریب انحناء منحنی دانه‌بندی	$C_c$	-	۱/۰۸
۵	توده ویژه	$G_s$	-	۲/۷۱
۶	رطوبت	$\omega$	%	۰/۵۰
۷	تخلخل حداکثر	$e_{max}$	-	۱/۰۸
۸	تخلخل حداقل	$e_{min}$	-	۰/۶۹
۹	وزن مخصوص خشک حداقل	$(\gamma_d)_{min}$	gr/cm <sup>3</sup>	۱/۳۰
۱۰	وزن مخصوص خشک حداکثر	$(\gamma_d)_{max}$	gr/cm <sup>3</sup>	۱/۶۰
۱۱	زاویه اصطکاک داخلی	$\phi$	°	۳۲

جدول ۲: مشخصات ژئوگرید

Table 2

ردیف	پارامتر	واحد	مشخصات
۱	نوع پلیمر	-	HDPE
۲	شکل	-	صفحه‌ای
۳	رنگ	-	مشکی
۴	اندازه چشمه‌ها	mm	۸×۶
۵	ضخامت مش	mm	۳/۳
۶	وزن هر مترمربع	gr/m <sup>2</sup>	۷۳۰
۷	مقاومت کششی	kN/m	۷/۶۸



شکل ۷: منحنی دانه‌بندی مصالح خاکی مورد استفاده در پژوهش حاضر

Fig. 7. Grain size distribution curve of the soil used in this research

۴- برنامه آزمایش‌ها و نتایج

یکی از پارامترهای مهمی که در تکنیک مسلح‌سازی مورد توجه اکثر مهندسان و طراحان قرار گرفته است، عمق مناسب قرارگیری لایه ژئوگرید از کف شالوده می‌باشد. بنابراین هدف اصلی آزمایش‌های پژوهش حاضر، بررسی ابهامات موجود در این زمینه بوده که بدین منظور، هفت آزمایش بارگذاری صفحه روی خاک ماسه‌ای در شرایط غیرمسلح و مسلح انجام گرفته و عمق قرارگیری لایه ژئوگرید از کف شالوده به عنوان متغیر اصلی پژوهش، انتخاب شده تا اثر این پارامتر بر منحنی بار-نشست و باربری شالوده دایره‌ای و همچنین فشار ایجاد شده در نقاط مختلف زیر شالوده مورد بررسی قرار گیرد.

در کلیه آزمایش‌های صورت گرفته، بارگذاری به صورت کنترل نیرو

با نرخ ۱ kPa/s و تا نشست بی بعد  $s/D_F = 33\%$  به مدل شالوده اعمال گردیده است. همان طور که در بخش ۲-۳ نیز اشاره گردید، کلیه آزمایش‌ها روی ماسه با تراکم متوسط (دانسیته نسبی  $55\%$ ) انجام شده است. همچنین جهت مسلح‌سازی، از یک لایه ژئوگرید با قطر ۱۳۵۰ میلی‌متر یعنی با نسبت  $D_G/D_F = 4/5$  استفاده شده است. پیش‌تر عمر و همکاران [۲] دریافتند مسلح‌سازی به ازاء مقادیر  $b/B \geq 4/5$  اثر قابل توجهی بر بهبود ظرفیت باربری شالوده‌های مربعی ندارد. همچنین عمق بی بعد قرارگیری اولین لایه مسلح‌کننده ( $u/D_F$ ) در آزمایش‌ها متغیر و برابر  $0/17$ ،  $0/33$ ،  $0/50$ ،  $0/67$  و  $0/83$  در نظر گرفته شده است.

جهت تعیین کارایی و مطالعه تأثیر مسلح‌سازی بر عملکرد شالوده، از پارامتر بی بعد نسبت باربری استفاده شده است:

$$BCR = \frac{q_R}{q_{UR}} \quad (2)$$

که BCR نسبت باربری در حالت مسلح به غیرمسلح و  $q_R$  و  $q_{UR}$  به ترتیب بار تحمل شده توسط شالوده واقع بر خاک مسلح و غیرمسلح می‌باشند. اگر در رابطه اخیر، از بارهای تحمل شده در نشست مشخص S استفاده شود، یعنی  $(q_s)_R$  و  $(q_s)_{UR}$ ، نسبت باربری در نشست مشخص،  $BCR_s$  بدست می‌آید که برای بارهای بهره‌برداری مناسب است و اگر از بار نهایی تحمل شده استفاده شود، یعنی  $(q_u)_R$  و  $(q_u)_{UR}$ ، نسبت ظرفیت باربری نهایی،  $BCR_u$  بدست می‌آید که برای حالت حدی مناسب است.

نتایج آزمایش‌ها در قالب نمودارهای بار-نشست در شکل ۸-الف نمایش داده شده است. نشست به صورت بی بعد، یعنی نسبت به قطر شالوده ( $s/D_F$ ) لحاظ شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، گسیختگی برشی ناگهانی و مشخصی (گسیختگی برشی کلی با برگشت ناگهانی منحنی بار-نشست) در توده خاک، در هیچ یک از حالت‌های خاک مسلح و غیرمسلح رخ نمی‌دهد که با نتایج گزارش شده توسط سایر محققین نظیر آدامس و کولین [۱۱]، بوشهریان و هاتف [۱۷] و دمیر و همکاران [۳۱] تطابق دارد. لذا بدلیل واضح و مشخص نبودن لحظه گسیختگی، مطابق توصیه مرجع [۱۱] و همان طور که در شکل ۸-ب برای آزمایش روی خاک غیرمسلح به عنوان نمونه نمایش داده شده، ظرفیت باربری نهایی پی از تقاطع مماس شیب ابتدا و انتهای منحنی بار-نشست تعیین گردیده است.

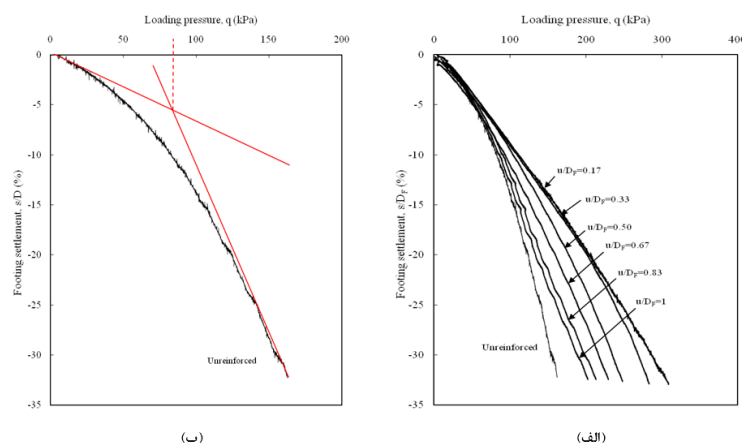
با استفاده از نمودارهای بار-نشست، نسبت باربری به ازاء مقادیر مختلف نشست بر اساس رابطه ۲ محاسبه شده و تغییرات آن با عمق مسلح‌کننده در جدول ۳ ارائه و جهت مقایسه بهتر در شکل ۹ نمایش داده شده است. همچنین، با تعیین ظرفیت باربری نهایی به روش گفته شده، مقادیر نسبت باربری نهایی از رابطه ۲ برای هر حالت محاسبه شده و تغییرات آن با عمق مسلح‌کننده در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



جدول ۳: نتایج نسبت باربری در نشست‌های مختلف برای خاک مسلح به ژئوگرید با عمق قرارگیری متفاوت

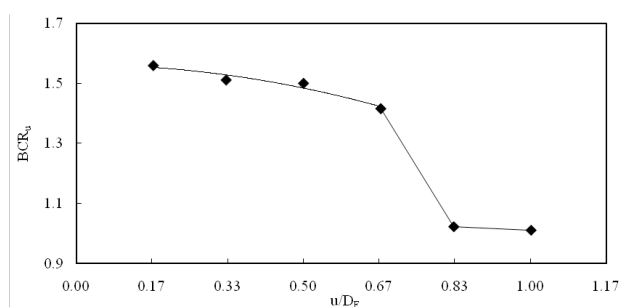
Table 3. Results of the bearing capacity ratio for different settlements of soil reinforced with geogrid at different depths

نسبت باربری نهایی ( $BCR_u$ )	نسبت باربری در نشست معین ( $BCR_s$ )							عمق ژئوگرید ( $u/D_f$ )	ردیف
	$s/D_f=3\%$	$s/D_f=25\%$	$s/D_f=20\%$	$s/D_f=15\%$	$s/D_f=10\%$	$s/D_f=7.5\%$	$s/D_f=5\%$		
۱/۵۵۹	۱/۸۲۴	۱/۷۵۷	۱/۶۲۴	۱/۴۸۵	۱/۳۲۹	۱/۲۲۰	۱/۱۸۸	۰/۱۷	۱
۱/۵۱۱	۱/۷۵۳	۱/۷۰۷	۱/۶۱۶	۱/۴۵۷	۱/۳۱۷	۱/۱۶۱	۱/۱۵۰	۰/۳۳	۲
۱/۵۰۰	۱/۵۱۲	۱/۴۶۴	۱/۴۱۶	۱/۳۶۱	۱/۲۵۶	۱/۱۶۱	۱/۱۵۰	۰/۵۰	۳
۱/۴۱۶	۱/۴۰۹	۱/۳۵۷	۱/۲۶۴	۱/۲۰۹	۱/۱۴۶	۱/۱۱۷	۱/۰۹۴	۰/۶۷	۴
۱/۰۲۳	۱/۲۷۹	۱/۲۳۵	۱/۱۵۲	۱/۱۱۴	۱/۰۹۷	۱/۰۷۳	۱/۰۱۸	۰/۸۳	۵
۱/۰۱۱	۱/۲۲۰	۱/۱۳۵	۱/۰۴۰	۱/۰۴۰	۱/۰۳۶	۱/۰۱۴	۱/۰۰۹	۱/۰۰	۶



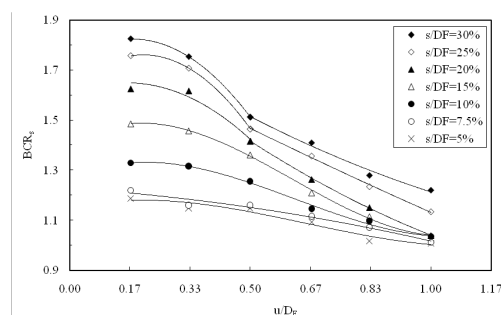
شکل ۸: الف) نمودار بار-نشست شالوده واقع بر خاک غیرمسلح و مسلح به ژئوگرید با عمق قرارگیری متفاوت و ب) نحوه تعیین مقدار ظرفیت باربری نهایی از روی نمودار بار-نشست شالوده واقع بر خاک غیرمسلح

Fig. 8. (a) load-settlement curve of the footing resting on sand unreinforced and reinforced with geogrid for different depths of the geogrid layer, and (b) the manner of determining ultimate bearing capacity from load-settlement curve of the footing resting on unreinforced soil



شکل ۱۰: تغییرات نسبت ظرفیت باربری نهایی با عمق قرارگیری لایه ژئوگرید

Fig. 10. Variation of the ultimate bearing capacity ratio with depth of geogrid layer



شکل ۹: تغییرات نسبت باربری با عمق قرارگیری لایه ژئوگرید به ازاء مقادیر مختلف نشست شالوده

Fig. 9. Variation of the bearing capacity ratio with depth of geogrid layer for different footing settlements

که این تغییرشکل‌ها در  $u/D_F = 0/17$  مشهودتر است ولی برای عمق‌های بیشتر، مقدار تغییرشکل‌ها و قطر ناحیه تغییرشکل یافته کاهش می‌یابد که تأیید کننده تغییر مکانیزم عملکرد مسلح‌سازی می‌باشد. نتایج جدول ۳ و شکل ۹ نیز روند تغییر مکانیزم را نشان می‌دهد. در نشست‌های نسبی  $s/D_F \leq 7/5\%$  مقدار  $BCR_s$  تقریباً به صورت یکنواخت با افزایش عمق، کاهش می‌یابد ولی با افزایش نشست‌ها و گسترش تغییرشکل‌ها، افت ناگهانی در مقدار  $BCR_s$  برای  $u/D_F \geq 0/33$  مشاهده می‌شود.

مقادیر فشار وارد بر کف شالوده،  $\sigma_n$  که در فواصل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متری از مرکز شالوده اندازه‌گیری شده، به صورت نرمالیزه شده (نسبت به فشار متوسط زیر شالوده،  $q_{avg}$ ) محاسبه شده و تغییرات آن با نشست بی بعد شالوده، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. البته در آزمایش  $u/D_F = 1$  فشارها اندازه‌گیری نشده و در آزمایش‌های  $0/83$  و  $0/67$  یکی از سیم‌های فشارسنج دوم (واقع در فاصله ۷۵ میلی‌متری از مرکز شالوده) قطع شده و مقادیر فشار در آن محل ثبت نشده است. بر اساس نتایج بدست آمده، مقدار فشار نرمالیزه شده در کلیه موارد تا نشست بی بعد حدود  $s/D_F = 1\%$  در حال افزایش است و به صورت کلی تا نشست بی بعد حدود  $s/D_F = 2/5\%$  متغیر است که به نظر می‌رسد علت آن اختلاف سطح اندک بین صفحه فشارسنج و کف شالوده و لقی اندک در اتصالات پیچ و مهره‌ای فشارسنج‌ها باشد که با افزایش نشست مرتفع می‌گردد. اما مقدار فشار نرمالیزه شده در اغلب موارد برای نشست‌های بی بعد بزرگ‌تر تقریباً ثابت می‌شود. روند کاهشی منحنی‌های فشار نرمالیزه شده مربوط به  $0/33$  و  $0/17$   $u/D_F$  در شکل ۱۱-الف به دلیل وارد شدن ذرات ریز ماسه به فضای بین صفحه فشارسنج و صفحه تحتانی شالوده بوده که در آزمایش‌های بعدی مرتفع شده است.

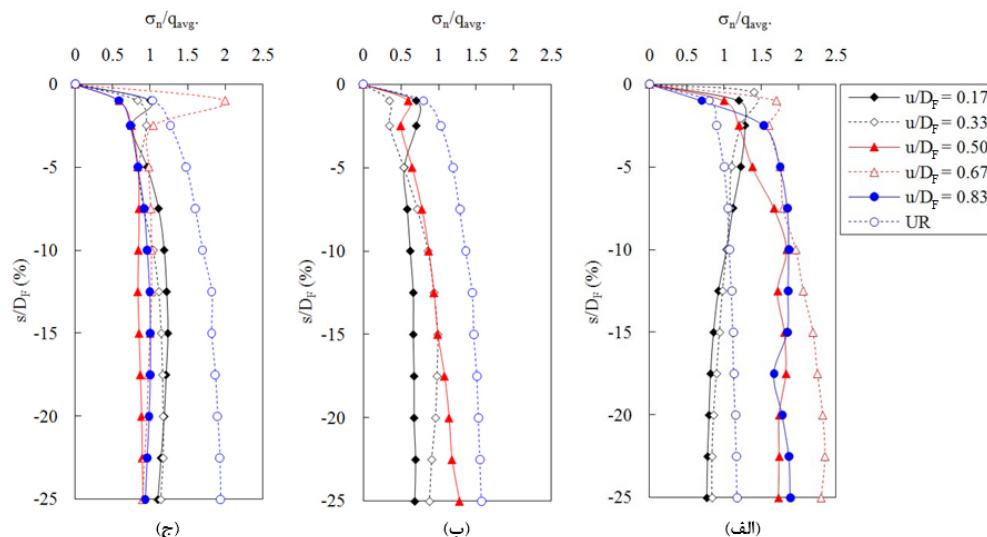
مطابق شکل ۱۱ و همان طور که انتظار می‌رود، در اغلب موارد با افزایش فاصله از مرکز شالوده، فشار نرمالیزه شده وارد بر کف شالوده کاهش می‌یابد و عکس‌العمل خاک (توزیع فشار در کف شالوده) در شرایط خاک مسلح و غیرمسلح به صورت غیر یکنواخت است. اما در مجموع می‌توان گفت که اطلاعات دست آمده به علت برخی خطاهای ایجاد شده، فاقد جامعیت کافی برای تحلیل و اظهار نظر بیشتر است.

بر اساس مطالعات مراجع [۲۹] و [۴۹] در زمینه آنالیز ابعادی و تعیین نسبت مقیاس (نسبت یک پارامتر در شرایط واقعی به همان پارامتر در شرایط مدل) برای مسائل بارگذاری خاک مسلح، می‌توان بیان نمود که اگر هدف تعیین عملکرد شالوده دایره‌ای با قطری  $N$  برابر قطر شالوده مدل (۳۰ سانتیمتر در تحقیق حاضر) باشد، باید مقاومت کششی و سختی ژئوگرید نسبت به شرایط مدل،  $N^2$  برابر گردد. همچنین، سیرش و همکاران [۲۹] بیان داشته‌اند که مکانیزم‌های کلی و رفتار مشاهده شده در مطالعات بزرگ مقیاس بارگذاری خاک مسلح (نظیر مرجع [۱۱]) نیز کاملاً مشابه آزمایش‌های مدل بوده است. لذا نتایج تحقیق حاضر در صورت رعایت مقیاس ذکر شده برای ژئوگرید قابل تعمیم به شرایط بزرگ مقیاس می‌باشد.

مطابق شکل ۸، می‌توان منحنی‌های بار-نشست آزمایش‌های بارگذاری خاک مسلح را به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول، مربوط به مقادیر نشست بی بعد  $s/D_F \leq 0/05$  که تکنیک مسلح‌سازی اثر چندانی بر باربری شالوده دایره‌ای ندارد و حداکثر مقدار  $BCR_s$  به  $1/188$  محدود می‌شود. بخش دوم، مربوط به مقادیر  $0/05 < s/D_F$  که اثر تکنیک مسلح‌سازی بر باربری شالوده دایره‌ای افزایش می‌یابد، به طوری که حداکثر مقدار  $BCR_s$  به  $1/824$  می‌رسد. در همین رابطه، نتایج جدول ۳ و شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که با افزایش نشست، نسبت باربری یعنی کارائی مسلح‌کننده، افزایش می‌یابد. پس مسلح‌سازی با ژئوگرید در مسائلی که هدف جلوگیری از وقوع تغییرشکل‌های بزرگ و یا گسیختگی برشی است، بسیار مفید خواهد بود. اما در مسائلی که هدف افزایش سختی پی در تغییرشکل‌های کوچک است، نظیر محدود ساختن نشست شالوده‌های گسترده که نشست بی بعد مجاز آنها بسیار اندک است، نگرانی‌هایی در خصوص کارائی روش مسلح‌سازی وجود خواهد داشت. پاسخ به اینکه اثرات مقیاس چگونه خواهد بود و اینکه ملاک فعال شدن ژئوگرید و رسیدن به کارائی مطلوب، مقدار نشست است یا نسبت نشست، نیاز به آزمایش‌های بیشتر با مقیاس واقعی دارد.

بر اساس جدول ۳ و اشکال ۹ و ۱۰، با کاهش عمق قرارگیری لایه ژئوگرید از کف شالوده در محدوده مورد مطالعه، نسبت باربری همواره افزایش یافته است. این نتیجه به صورت مشابه توسط مرجع [۱۷] نیز برای شالوده دایره‌ای مشاهده شده است که نشان از تطابق خوب میان نتایج این پژوهش با آن مرجع دارد. با رجوع به روند مشاهده شده در شکل ۱۰ و اینکه قرار دادن ژئوگرید روی سطح خاک ( $u/D_F = 0$ ) باعث افزایش باربری نمی‌شود ( $BCR_u = 1$ )، می‌توان نتیجه گرفت که عمق بی بعد مناسب برای قرارگیری ژئوگرید زیر شالوده دایره‌ای در بازه  $0/17 \leq (u/D_F)_{opt}$  قرار می‌گیرد. اما طبق مطالعات مراجع [۴۷ و ۴۸]، عمق بهینه قرارگیری لایه ژئوگرید از کف شالوده‌های نواری و مستطیلی حدود  $0/30$  کوچکترین بعد شالوده است و لذا با توجه به نتایج تحقیق حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که عمق بهینه قرارگیری لایه مسلح‌کننده برای شالوده دایره‌ای کمتر از سایر انواع شالوده است.

بر اساس شکل ۱۰ می‌توان به لحاظ عمق قرارگیری مسلح‌کننده، دو حالت را در نظر گرفت. حالت اول، مربوط به  $u/D_F \leq 0/67$  که اثرات مسلح‌سازی کاملاً مشهود است و حالت دوم، مربوط به عمق‌های بیشتر که مسلح‌سازی تأثیر چندانی بر باربری شالوده دایره‌ای ندارد، به طوری که به ازاء  $u/D_F < 0/67$ ، مقدار  $BCR_u$  تقریباً ثابت می‌شود. این امر نشان‌دهنده تغییر مکانیزم عملکرد ژئوگرید است، یعنی با افزایش عمق ژئوگرید از کف شالوده، فضای موجود چنان افزایش می‌یابد که ژئوگرید نمی‌تواند مانع از گسترش سطوح لغزش در این فاصله شود و گسیختگی در توده خاک بالای لایه ژئوگرید رخ می‌دهد. مطابق مشاهدات صورت گرفته از وضعیت لایه ژئوگرید پس از اتمام آزمایش، تغییرشکل‌های پلاستیک و خم‌شدگی در لایه ژئوگرید برای  $u/D_F \leq 0/33$  فقط در محل لبه‌های شالوده ایجاد می‌شود



شکل ۱۱: نمودار فشار-نشست کف شالوده؛ الف) فاصله ۵۰ میلی‌متر از مرکز، ب) فاصله ۷۵ میلی‌متر از مرکز و ج) فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از مرکز

Fig. 11. Pressure-settlement curve at base of the footing for; (a) 50 mm distance from the center, (b) 75 mm distance from the center, and (c) 100 mm distance from the center

ضرورت استفاده از صفحه‌ای متناسب با شکل شالوده سازه را جهت

مطالعه بهتر رفتار بستر تأکید می‌کند.

با افزایش عمق قرارگیری لایه ژئوگرید از کف شالوده، نسبت باربری نهایی،  $BCR_u$  و نسبت باربری در نشست‌های مختلف،  $BCR_s$  یعنی به ترتیب، ظرفیت باربری نهایی و سختی پی کاهش می‌یابند. در این روند کاهشی، افت ناگهانی یا تغییر محسوس نرخ کاهش مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تغییر مکانیزم عملکرد مسلح‌کننده است. عمق تغییر مکانیزم برای ظرفیت باربری نهایی حدود  $0.67 D$  و برای سختی پی حدود  $0.33 D$  است. بنابراین برای دستیابی به کارایی مطلوب مسلح‌کننده، لازم است عمق قرارگیری آن کمتر از  $0.33 D$  از کف شالوده دایره‌ای باشد.

تکنیک مسلح‌سازی دارای کارایی قابل توجهی در مسأله ظرفیت باربری خاک دانه‌ای است زیرا یک لایه ژئوگرید در عمق بهینه می‌تواند با جلوگیری از گسیختگی برشی در توده خاک زیر شالوده، ظرفیت باربری نهایی خاک را تا ۵۶ درصد نسبت به حالت غیرمسلح افزایش دهد.

اگر چه یک لایه ژئوگرید در عمق بهینه می‌تواند باربری خاک دانه‌ای در نشست مشخص را تا ۸۲ درصد نسبت به حالت غیرمسلح افزایش دهد ولی به نظر می‌رسد کارایی تکنیک مسلح‌سازی در مسأله نشست ضعیف‌تر از مسأله ظرفیت باربری باشد زیرا در نشست‌های کمتر از نشست متناظر با حالت گسیختگی، یعنی نشست‌های کمتر از  $0.75 D$ ، افزایش باربری نسبت به حالت غیرمسلح کمتر از ۲۰ درصد است.

## ۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک سیستم آزمایشگاهی توسعه یافته جهت بارگذاری بر روی یک شالوده دایره‌ای (آزمایش بارگذاری صفحه) طراحی و ساخته شده که جزئیات و مبنای انتخاب، طراحی و ساخت بخش‌های مختلف آن بیان شده است. آزمایش‌های مختلف صورت گرفته، صحت و دقت عملکرد اجزاء این سیستم را تأیید کرده است. هفت آزمایش بارگذاری صفحه بزرگ مقیاس بر روی شالوده دایره‌ای واقع بر ماسه غیرمسلح و مسلح به یک لایه ژئوگرید صورت گرفته تا اثر مسلح‌سازی خاک و اثر عمق قرارگیری مسلح‌کننده از کف شالوده مورد بررسی قرار گیرد. برخی از یافته‌های به دست آمده از آزمایش‌های پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشند:

۱. مجموعه شالوده طراحی و ساخته شده قادر است فشار قائم وارد

بر کف شالوده را در سه فاصله مختلف از مرکز شالوده اندازه‌گیری کند و مقادیر فشار اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که عکس العمل خاک مسلح و غیرمسلح، غیر یکنواخت است و با افزایش فاصله از مرکز شالوده، مقدار فشار کاهش می‌یابد.

۲. سیستم بارش پرده‌ای متحرک طراحی و ساخته شده قادر به ساخت نمونه‌های حجیم به صورت کاملاً همگن با دامنه وسیعی از مقادیر دانسیته نسبی، از  $27/6$  تا  $95/8$  درصد است که با کالیبراسیون دستگاه و انتخاب ضخامت پرده و ارتفاع بارش مناسب می‌توان با بیشترین سرعت و دقت به دانسیته مورد نظر دست یافت.

۳. عمق بهینه قرارگیری مسلح‌کننده از کف شالوده دایره‌ای  $(u/D_f)_{opt} \leq 0.17$  و کمتر از مقدار گزارش شده توسط سایر محققین برای شالوده‌های نواری و مربعی است که این تفاوت،

- [6] C.R. Patra, B.M. Das, C. Atalar, Bearing Capacity of Embedded Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(5) (2005) 454-462.
- [7] C.R. Patra, B.M. Das, M. Bhoi, E.C. Shin, Eccentrically Loaded Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4) (2006) 254-259.
- [8] M. El Sawwaf, Experimental and Numerical Study of Eccentrically Loaded Strip Footings Resting on Reinforced Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10) (2009) 1509-1518.
- [9] S.N. Moghaddas Tafreshi, A.R. Dawson, Comparison of Bearing Capacity of a Strip Footing on Sand with Geocell and with Planar Forms of Geotextile Reinforcement, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1) (2010) 72-84.
- [10] S.N. Moghaddas Tafreshi, A.R. Dawson, Behaviour of Footings on Reinforced Sand Subjected to Repeated Loading - Comparing Use of 3D and Planar Geotextile, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(5) (2010) 434-447.
- [11] M.T. Adams, J.G. Collin, Large Model Spread Footing Load Tests on Geosynthetic Reinforced Soil Foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1) (1997) 66-72.
- [12] A. Ghosh, A. Ghosh, A.K. Bera, Bearing Capacity of Square Footing on Pond Ash Reinforced with Jute-Geotextile, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(2) (2005) 144-173.
- [13] W. Chung, G. Cascante, Experimental and Numerical Study of Soil-Reinforcement Effects on the Low-Strain Stiffness and Bearing Capacity of Shallow Foundations, *Geotechnical & Geological Engineering*, 25(3) (2007) 265-281.
- [14] G.M. Latha, A. Somwanshi, Bearing Capacity of Square Footings on Geosynthetic Reinforced Sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(4) (2009) 281-294.
- [15] G.M. Latha, A. Somwanshi, Effect of Reinforcement Form on the Bearing Capacity of Square Footings on Sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6) (2009) 409-422.
- [16] N.F. Ismael, Loading Tests on Circular and Ring Plates in Very Dense Cemented Sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4) (1996) 281-287.
- [17] J.H. Boushehrian, N. Hataf, Experimental and Numerical Investigation of the Bearing Capacity of Model Circular and Ring Footings on Reinforced Sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 21(4) (2003) 241-256.

## ۶- فهرست علائم

- $BCR_s$  نسبت باربری در یک نشست مشخص (-)
- $BCR_u$  نسبت ظرفیت باربری نهایی (-)
- $C_c$  ضریب خمیدگی منحنی دانه‌بندی (-)
- $C_u$  ضریب یکنواختی منحنی دانه‌بندی (-)
- $D_F$  قطر شالوده (mm)
- $D_G$  قطر ژئوگرید (mm)
- $D_{10}$  اندازه مؤثر دانه‌ها (mm)
- $D_{50}$  اندازه متوسط دانه‌ها (mm)
- $DI$  شدت بارش ( $gr/cm^2/s$ )
- $e_{max}$  تخلخل حداکثر (-)
- $e_{min}$  تخلخل حداقل (-)
- $G_s$  توده ویژه (-)
- $HF$  ارتفاع بارش (mm)
- $RD$  دانسیته نسبی (%)
- $s$  نشست شالوده (mm)
- $U$  فاصله قائم لایه ژئوگرید از کف شالوده (mm)
- $\omega$  میزان رطوبت (%)
- $(\gamma_d)_{max}$  وزن مخصوص خشک حداکثر ( $gr/cm^3$ )
- $(\gamma_d)_{min}$  وزن مخصوص خشک حداقل ( $gr/cm^3$ )
- $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی ماسه (درجه)

## مراجع

- [1] R.J. Frigaszy, E. Lawton, Bearing Capacity of Reinforced Sand Subgrades, *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(10) (1984) 1500-1507.
- [2] M.T. Omar, B.M. Das, V.K. Puri, S.C. Yen, Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations on Sand with Geogrid Reinforcement, *Canadian Geotechnical Journal*, 30(3) (1993) 545-549.
- [3] M.T. Omar, B.M. Das, V.K. Puri, S.C. Yen, E.E. Cook, Shallow Foundations on Geogrid-Reinforced Sand, *Transportation Research Record*, (1414) (1992) 59-64.
- [4] E.C. Shin, B.M. Das, E.S. Lee, C. Atalar, Bearing Capacity of Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand, *Geotechnical & Geological Engineering*, 20(2) (2002) 169-180.
- [5] S.K. Dash, K. Rajagopal, N.R. Krishnaswamy, Performance of Different Geosynthetic Reinforcement Materials in Sand Foundations, *Geosynthetics International*, 11(1) (2004) 35-42.



- [31] A. Demir, A. Yildiz, M. Laman, M. Ornek, Experimental and Numerical Analyses of Circular Footing on Geogrid-Reinforced Granular Fill underlain by Soft Clay, *Acta Geotechnica*, 9(4) (2014) 711-723.
- [32] ASTM D1194-94, Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings (Withdrawn 2003), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [33] M. Naseri, E.S. Hosseini, Elastic Settlement of Ring Foundations, *Soils and Foundations*, 55(2) (2015) 284-295.
- [34] M. Movahedifar, J. Bolouri-Bazaz, An Investigation on the Effect of Cyclic Displacement on the Integral Bridge Abutment, *Journal of Civil Engineering Management*, 20(2) (2014) 256-269.
- [35] P.T. Brown, Numerical Analyses of Uniformly Loaded Circular Rafts on Deep Elastic Foundations, *Geotechnique*, 19(3) (1969) 399-404.
- [36] M. Aryafar, S. Abrishami, M. Azadi, Modeling of Dynamic Behavior of Circular Foundations Resting on Sand Reinforced with Geogrid Using Finite Element Methods, in: 4th Int. Conf. Geot. Eng. Soil Mech., Tehran, Iran, 2010.
- [37] T.W. Pfeifle, B.M. Das, Model Tests for Bearing Capacity in Sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(9) (1979) 1112-1116.
- [38] S. Abrishami, The Study of Cyclic Bearing Capacity of Dry Geogrid Reinforced Sand by Physical Modeling, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2010.
- [39] A. Tabaroei, S. Abrishami, E.S. Hosseini, Comparison between Two Different Pluviation Setups of Sand Specimens, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10) (2017) 04017157.
- [40] B.M. Das, Principles of Foundation Engineering, Cengage learning, 2015.
- [41] ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [42] 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.
- [43] ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [44] ASTM D4254-16, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [18] M. Laman, A. Yildiz, Numerical Studies of Ring Foundations on Geogrid-Reinforced Sand, *Geosynthetics International*, 14(2) (2007) 52-64.
- [19] M. El Sawwaf, A. Nazir, Behavior of Eccentrically Loaded Small-Scale Ring Footings Resting on Reinforced Layered Soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(3) (2011) 376-384.
- [20] J. Binquet, K.L. Lee, Bearing Capacity Tests on Reinforced Earth Slabs, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(12) (1975a) 1241-1255.
- [21] J. Binquet, K.L. Lee, Bearing Capacity Analysis of Reinforced Earth Slabs, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(12) (1975b) 1257-1276.
- [22] V.A. Guido, D.K. Chang, M.A. Sweeney, Comparison of Geogrid and Geotextile Reinforced Earth Slabs, *Canadian Geotechnical Journal*, 23(4) (1986) 435-440.
- [23] V.A. Guido, J.D. Knueppel, M.A. Sweeney, Plate Loading Tests on Geogrid-Reinforced Earth Slab, in: *Geosynthetics' 87 Conf.*, New Orleans, 1987, pp. 216-225.
- [24] E.C. Shin, B.M. Das, C. Atalar, Cyclic Plate Load Test on Geogrid-Reinforced Granular Pad, in: *Proceedings of the VII International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, 2002, pp. 423-426.
- [25] S.K. Dash, S. Sireesh, T.G. Sitharam, Model Studies on Circular Footing Supported on Geocell Reinforced Sand underlain by Soft Clay, *Geotextiles and Geomembranes*, 21(4) (2003) 197-219.
- [26] T.G. Sitharam, S. Sireesh, Model Studies of Embedded Circular Footing on Geogrid-Reinforced Sand Beds, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 8(2) (2004) 69-75.
- [27] T.G. Sitharam, S. Sireesh, Behavior of Embedded Footings Supported on Geogrid Cell Reinforced Foundation Beds, *Geotechnical Testing Journal*, 28(5) (2005) 452-463.
- [28] P. Basudhar, S. Saha, K. Deb, Circular Footings Resting on Geotextile-Reinforced Sand Bed, *Geotextiles and Geomembranes*, 25(6) (2007) 377-384.
- [29] S. Sireesh, T.G. Sitharam, S.K. Dash, Bearing Capacity of Circular Footing on Geocell-Sand Mattress overlying Clay Bed with Void, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2) (2009) 89-98.
- [30] A.A. Lavasan, M. Ghazavi, Behavior of Closely Spaced Square and Circular Footings on Reinforced Sand, *Soils and Foundations*, 52(1) (2012) 160-167.

- [47] B.M. Das, E.C. Shin, M.T. Omar, The Bearing Capacity of Surface Strip Foundations on Geogrid-Reinforced Sand and Clay - A Comparative Study, *Geotechnical & Geological Engineering*, 12(1) (1994) 1-14.
- [48] T. Yetimoglu, J.T.H. Wu, A. Saglamer, Bearing Capacity of Rectangular Footings on Geogrid-Reinforced Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12) (1994) 2083-2099.
- [49] B.V.S. Viswanadham, D. König, Studies on Scaling and Instrumentation of a Geogrid, *Geotextiles and Geomembranes*, 22(5) (2004) 307-328.
- [45] ASTM D2487-17, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [46] ASTM D3080 / D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Tabaroei, S. Abrishami, E. Seyed Hosseininia, N. Ganjian, A study on bearing capacity of circular footing resting on geogrid reinforced granular soil, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 973-986.

DOI: 10.22060/ceej.2017.13150.5339

