

عملکرد ژئوتکنیکی فونداسیون‌های پوسته‌ای مستقر در خاک‌های ماسه‌ای سست غیر مسلح و مسلح شده

کامران ابراهیمی^۱، سید محمدامین نعمت پور^۲، جهانگیر خزائی^{۳*}

- ۱- دانش آموخته دوره دکتری، دانشگاه رازی
- ۲- دانش آموخته دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی
- ۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
j.khazaie@razi.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵

چکیده

این مطالعه به ارائه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی روی شالوده‌های پوسته‌ای مخروطی و هرمی قرار گرفته روی ماسه سست غیر مسلح و مسلح شده با ژئوگرید می‌پردازد. نتایج با مقادیر مطالعه شده برای فونداسیون‌های مسطح دایره‌ای و مربعی مقایسه شده است. مطالعات آزمایشگاهی روی انواع مختلف شالوده پوسته‌ای با زوایای رأس مختلف و با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس انجام شد. به منظور بسط مطالعات برای تاثیر حالات مختلف نسبت عمق مدفون به عرض پی و تعداد لایه‌های ژئوگرید بر نسبت ظرفیت باربری، تحلیل‌های عددی با استفاده از روش آنالیز حدی صورت گرفت. نتایج نشان دادند که به طور کلی، افزایش عمق شالوده و استفاده از سازه‌های مسلح کننده عملکرد ژئوتکنیکی فونداسیون‌ها را در هر دو حالت مسطح و پوسته‌ای افزایش می‌دهد هرچند این افزایش در شالوده‌های مسطح مشهودتر است، به طوری که افزایش عمق پی به اندازه $D_f/B=0.5$ ، مقدار ظرفیت باربری برای شالوده‌ها با زاویه رأس 180° ، 120° ، 90° و 60° را به طور میانگین به ترتیب 40 ، 36 و 32 درصد و افزایش عمق پی به اندازه $D_f/B=1.0$ به ترتیب 76 ، 77 و 55 درصد افزایش می‌دهد. استفاده از ژئوگرید ظرفیت باربری شالوده‌های مسطح را بیش از شالوده‌های پوسته‌ای افزایش می‌دهد. استفاده از یک لایه ژئوگرید ظرفیت باربری شالوده‌های قرار گرفته روی سطح خاک را به طور میانگین 79 درصد افزایش داد در حالیکه استفاده از دو لایه ژئوگرید ظرفیت باربری را 86 درصد افزایش می‌دهد که این موضوع نمایانگر این واقعیت است که استفاده از دو لایه ژئوگرید موجب بهبود چشمگیر ظرفیت باربری نسبت به حالتی که خاک با یک لایه ژئوگرید مسلح می‌شود نخواهد شد. ظرفیت باربری شالوده مدفون با $D_f/B=0.5$ و یک لایه ژئوگرید 50 درصد و با دو لایه ژئوگرید 53 درصد و برای شالوده‌های مدفون با $D_f/B=1.0$ و یک لایه ژئوگرید 28 درصد و با دو لایه ژئوگرید 30 درصد بیش از شالوده‌های قرار گرفته روی سطح خاک غیر مسلح خواهد بود. برای شالوده قرار گرفته روی سطح خاک با زوایای رأس 180° ، 120° ، 90° و 60° استفاده از یک لایه ژئوگرید به طور میانگین ظرفیت باربری را به ترتیب 99 ، 81 و 75 درصد و استفاده از دو لایه ژئوگرید به ترتیب 110 ، 90 و 78 درصد افزایش می‌دهد. این شرایط برای پی‌های مدفون کمتر محسوس بوده و مقدار افزایش ظرفیت باربری برای پی‌ها با تمام زوایای رأس برای حالت $D_f/B=0.5$ حدود 50 درصد و برای حالت $D_f/B=1.0$ حدود 29 درصد است. استفاده از دو لایه ژئوگرید بر پی‌های با زوایای رأس کمتر، تاثیر کمتری خواهد داشت.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری، نشت، فونداسیون‌های پوسته‌ای مخروطی و هرمی، ژئوگرید، ماسه مسلح شده

استفاده از نتایج تست‌های آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که در شرایط یکسان برای مشخصات خاک و بارگذاری، ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌ای به طور متوسط ۴۵–۴۰٪ بیشتر از همتایان مسطح‌شان است [7]. کاظمی و بلوری براز (۲۰۱۸) ظرفیت باربری پی‌های مرکب پوسته‌ای حلقوی روی خاک دانه‌ای را با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بار نهایی پی‌های مرکب بیشتر از پی‌های حلقوی است و با افزایش زاویه پوسته مقدار بار نهایی کاهش می‌یابد، همچنین بازدهی پوسته‌ها در خاک‌های با تراکم کمتر مطلوب‌تر است. ایشان همچنین یک رابطه برای پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی پی‌های مرکب ارائه کردند [8].

کومار و ساباگیری‌راج (۲۰۱۹) نشان دادند که کارآیی شالوده‌های پوسته‌ای هرمی نسبت به پی‌های تخت در ماسه‌های سست و مترکم به ترتیب ۷۵٪ و ۶۷٪ بیشتر است. ویژگی نشست فونداسیون‌های پوسته‌ای مثلثی در هر دو شرایط بهتر از مدل‌های دیگر است. در ماسه راندمان پی‌های پوسته‌ای بیش از خاک رس است، بنابراین شالوده‌های پوسته‌ای در خاک ماسه‌ای عملکرد بهتری دارند [9].

با توجه به شرایط پیچیده تنش تحت پی‌های پوسته‌ای، روش‌های تحلیل عددی مانند المان محدود، تفاضل محدود، تحلیل حدی و ... می‌توانند راه‌گشایی مسائلی باشند که در محیط آزمایشگاه امکان مطالعه و بررسی ندارند. پژوهشگران از بسیاری از این روش‌ها برای مطالعه این سازه‌ها بهره گرفته‌اند [10 و 11]. در سال ۲۰۱۹ حسن^۱ و همکاران رفتار پی‌های هرمی را روی ماسه مسلح شده با ژئوگرید با استفاده از مدل سازی فیزیکی و مطالعات عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بررسی کردند. هدف از این پژوهش، مطالعه پی‌های هرمی با زوایای رسم مختلف، ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه و مقایسه با همتایان مسطح آن‌ها بود. ایشان همچنین از سه تراکم مختلف خاک با مقادیر ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد بهره برداشتند. نتایج نشان دادند کاهش زاویه رأس موجب افزایش ظرفیت باربری خواهد شد. همچنین بازدهی پی‌های پوسته‌ای در

۱- مقدمه

ظرفیت باربری، بیشینه فشار قابل تحمل خاک است که بسته به شکل پی، چگونگی توزیع فشار و گسیختگی خاک تغییر می‌کند. تاکنون روابط مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی‌های نواری، مستطیلی و دایره‌ای ارائه شده است که در همه آن‌ها اهمیت شکل پی به علت چگونگی گسترش تنش در خاک زیر پی نمایان است. یکی از انواع پی‌ها، پی‌های پوسته‌ای است که برای انتقال بار سیلوها، مخازن ذخیره آب، برج‌های رادیویی و مناره‌ها به خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. پی‌های پوسته‌ای برای بیشتر سازه‌های با هندسه تقارن محوری و بار قائم، یک پی مناسب و اقتصادی بوده و استفاده عملی از آن نسبت به پی مسطح بسیار باصره است [1].

استفاده از پی‌های پوسته به عنوان فونداسیون سابقه‌ای طولانی در صنعت ساختمان‌سازی دارد. شالوده‌های آجری قوس‌دار برای سازه‌های بنایی از اولین کاربردهای شناخته شده فونداسیون‌های پوسته‌ای محسوب می‌شود. این گروه از شالوده‌ها، جایگزین‌های اقتصادی مناسب برای شالوده‌های متداول هستند هرچند مطالعات بیشتری به منظور تعیین عملکرد ژئوتکنیکی آن‌ها نیاز است. اولین پژوهش علمی روی فونداسیون‌پوسته‌ای مربوط به اوخر دهه هفتاد میلادی، نیکولاس^۲ و ایزدی^۳ (۱۹۶۸)، یک سری از پژوهش‌های آزمایشگاهی را روی شالوده‌های پوسته‌ای مخروطی و همتایان مسطح آن‌ها به منظور تعیین توزیع فشار تماسی به عنوان تابعی از ظرفیت باربری نهایی، بنیان نهادند. نتایج این مطالعات مشخص کردند که فشار تماسی محاسبه شده در نزدیکی محیط پوسته تقریباً ۱/۵ برابر فشار تماسی در مرکز پی بود. اییر^۴ و رائو^۵ (۱۹۷۰) [3] گروهی از تست‌های آزمایشگاهی را برای مقایسه ظرفیت باربری فونداسیون‌های پوسته‌ای و مسطح سازماندهی کردند. گزارشات آن‌ها نیز مؤید این حقیقت بود که ظرفیت باربری فونداسیون‌های مسطح بیشتر است. مطالعات آزمایشگاهی روی این گروه از فونداسیون‌ها تا به امروز ادامه یافته است [۴، ۵ و ۶]. در سال ۲۰۱۷ رینالدی^۶ و همکاران با

4. Rao
5. Rinaldi
6. Hassan

1. Nicholls
2. Izadi
3. Iyer

است نتایج ارائه شده به گونه‌ای باشد که بتوان از آن‌ها به عنوان راهنمایی عملی برای شرایط استفاده از این گروه از فونداسیون‌های مدرن استفاده کرد.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

مروری بر متون فنی نشان داده است که فونداسیون‌های پوسته‌ای هرمی و مخروطی، به طور محسوسی، دارای ظرفیت باربری بیشتری نسبت به شالوده‌های پوسته‌ای گنبدی هستند. پس این دو گروه شالوده برای انجام آزمایش‌ها و مقایسه ظرفیت باربری با پی‌های مربعی و دایره‌ای انتخاب شدند. بدین منظور، هشت شالوده مختلف با عرض (قطر) برابر با پنج سانتی‌متر ($B=5\text{ cm}$) و زوایای رأس(α) برابر با $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ و 180° (شالوده‌های با زاویه رأس 180° ، همان پی‌های مسطح هستند)، مطابق آنچه در شکل (۱) نمایش داده شده است، تحت آزمایش قرار گرفت.

شکل ۱. نمای کلی از مدل‌های فونداسیون‌ها



Fig 1. General view of foundations models

شکل (۲)، تصویری از دستگاه فلزی مدل فیزیکی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. ابعاد این دستگاه با کمک مدل‌سازی‌های عددی و بر اساس بیشترین بعد لازم برای استهلاک تنش‌های اعمالی محاسبه شده است. با توجه به نوع خاک ماسه‌ای مورد استفاده، آنالیز ابعادی به منظور تاثیر پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری انجام شد.

شکل ۲. مجموعه انجام تست‌های آزمایشگاهی

خاک‌های با تراکم کمتر بیشتر است [12]. ابراهیمی و خرائی (۲۰۱۹) [13] به منظور بررسی ظرفیت باربری شالوده‌های پوسته‌ای نواری با مقطع مثلثی و فونداسیون نواری، مدل‌سازی روی فونداسیون‌هایی با ابعاد متغیر در سه عمق مختلف با نسبت عمق به عرض شالوده، $0/5$ و 1 را با استفاده از روش تحلیل حدی انجام دادند. مطالعات ایشان نشان دادند که الگوی خرابی در فونداسیون‌ها مستقل از ابعاد پی، به شکل، زبری و عمق پی وابسته بوده و با افزایش زبری شالوده، سطح گسینختگی به گوشه مفروض در نظریات ظرفیت باربری متداول (به ویژه روش میرهوف) نزدیک خواهد شد. در سال ۲۰۲۱، غفاری و همکاران، پاسخ پی‌های نواری پوسته‌ای مثلثی شکل واقع در نزدیکی شبیه روی خاک ماسه‌ای مسلح شده را بررسی کردند. مشاهده شد که کاهش زاویه رأس پوسته و همچنین افزایش فاصله از لبه شبیه می‌تواند به شکل قابل توجهی ظرفیت باربری را بهبود بخشد. با این حال، با افزایش فاصله از لبه، اثر زاویه رأس بر ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که با افزایش فاصله از لبه شبیه، اثر مفید مسلح‌سازی خاک بر ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نسبت افزایش ظرفیت باربری پی‌های پوسته‌ای در خاک تقویت‌شده در مقایسه با وضعیت تقویت نشده کمتر است [14].

بررسی تمام پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری شالوده‌های پوسته‌ای همچنان از گزینه‌های نیازمند مطالعه است به شکلی که هنوز شرایط جامعه‌ای برای موارد قابل استفاده از این گروه از پی‌ها ارائه نشده است. در این مقاله با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی ظرفیت باربری و شرایط نشست شالوده‌های پوسته‌ای مخروطی و هرمی قرارگرفته روی ماسه سست غیر مسلح و مسلح شده با زئوگرید بررسی شده است. برای تست‌های آزمایشگاهی، جعبه مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس ساخته شد و ۸ گروه مختلف از فونداسیون‌های مینیاتوری مورد آزمایش قرار گرفت. تحلیل‌های عددی با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود و به کمک نرم‌افزار OptumeG3 انجام شد. با توجه به بررسی پارامترهای مختلف موثر بر ظرفیت باربری، تلاش شده

است که در واقعیت دارد بنابراین زاویه رأس در نظر گرفته شده برای مدل با واقعیت یکسان است. رابطه ۶ بیانگر این حقیقت است که نسبت ظرفیت باربری پی در واقعیت و مدل نیز N است، یعنی با افزایش N برابری عرض پی، ظرفیت باربری نیز N برابر افزایش خواهد یافت. از این رابطه در تعیین ظرفیت باربری پی با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه (ASTM 1194) نیز بهره گرفته می‌شود.

مطالعات عددی نشان دادند که تغییر ابعاد پی، بر نسبت ظرفیت باربری بی تاثیر است. با توجه به آنکه در این مطالعه، هدف اصلی تعیین نسبت ظرفیت باربری شالوده پوسته‌ای به شالوده مسطح است، اثر مقیاس بر روی ظرفیت باربری هر دو گروه فونداسیون‌ها دارای تاثیر یکسان بود و بر انتخاب ابعاد مدل تاثیری نخواهد داشت. با توجه به آنچه بیان شد، جعبه آزمایش دارای ابعاد داخلی 50×50 سانتی‌متر مربع در صفحه و با عمق ۵۰ سانتی‌متر و ضخامت جداره ۸ میلی‌متر ساخته شد. صلبیت این جعبه به اندازه‌های است که بتوان از تأثیر تغییر مکان‌های افقی شرایط مرزی روی آزمایش چشم‌پوشی کرد.

سیستم بارگذاری شکل (۳) به منظور اعمال بار بر مجموعه شالوده- خاک، شامل جک هیدرولیکی و سلول بار (لودسل) است و مقادیر نشست به کمک LVDT مستقر بر شالوده اندازه‌گیری می‌شود.

شکل ۳. سیستم بارگذاری



Fig. 3. Loading system



Fig. 2. Facilities for laboratory tests

مقدار هر متغیر بدون بعد در مدل و واقعیت باید یکسان باشد. برای پی‌های پوسته‌ای در حالتی که از ژئوگرید استفاده نشود ظرفیت باربری (q_u) را می‌توان تابع عرض پی (B)، وزن مخصوص خاک (γ)، زاویه اصطکاک خاک (φ)، عمق پی (D_f) و زاویه رأس پی (α) دانست. اگر معادله حاکم بر سیستم f باشد.

$$f(q_u, B, \gamma, \phi, D_f, \alpha) = 0 \quad (1)$$

با تبدیل رابطه ۱ به تابعی با متغیرهای بدون بعد، می‌توان نوشت:

$$f\left(\frac{q_u}{B\gamma}, \frac{D_f}{B}, \frac{\alpha}{\phi}\right) = 0 \quad (2)$$

اگر مقیاس هندسی مدل $\frac{1}{N}$ باشد آنگاه ابعاد هندسی مدل فیزیکی N بار کوچکتر از واقعیت خواهد بود. یعنی در این مسئله داریم:

$$\frac{B_p}{B_m} = N \quad (3)$$

با توجه به قوانین تشابه با برابر قراردادن پارامترهای بی بعد بدست می‌آید:

$$\left(\frac{D_f}{B}\right)_p = \left(\frac{D_f}{B}\right)_m \rightarrow \frac{D_{fp}}{D_{fm}} = \frac{B_p}{B_m} = N \quad (4)$$

$$\left(\frac{\alpha}{\phi}\right)_p = \left(\frac{\alpha}{\phi}\right)_m \rightarrow \frac{\alpha_p}{\alpha_m} = \frac{\phi_p}{\phi_m} = 1 \quad (5)$$

$$\left(\frac{q_u}{B\gamma}\right)_p = \left(\frac{q_u}{B\gamma}\right)_m \rightarrow \frac{q_{up}}{q_{um}} = \frac{B_p\gamma_p}{B_m\gamma_m} = 1 \quad (6)$$

از رابطه ۴ می‌توان فهمید که مقیاس هندسی برای نسبت عمق مدفون پی نیز N خواهد بود، یعنی عمق مدفون پی در واقعیت باید N برابر مدل درنظر گرفته شود. رابطه ۵ نشان می‌دهد که نسبت زاویه رأس پی در واقعیت به مدل با نسبت اصطکاک داخلی خاک در واقعیت و مدل برابر است و با توجه به اینکه معمولاً خاک استفاده شده در مدل دارای همان زاویه اصطکاکی

فازویه اصطکاک داخلی ماسه خشک، c چسبندگی ماسه خشک و ϕ وزن واحد خشک ماسه است.

شکل ۴. منحنی توزیع دانه‌بندی خاک آزمایش شده

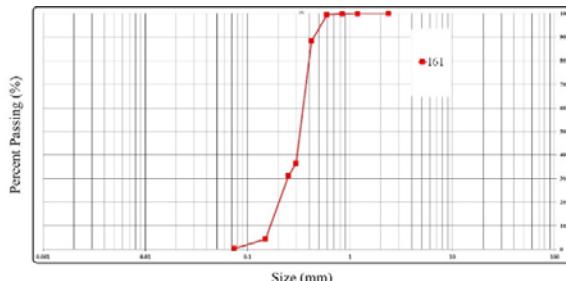


Fig. 4. Particle size distribution of the soil

۱-۲- مصالح آزمایش

الف) خاک: خاک استفاده شده در این مطالعه ماسه استاندارد فیروزکوه (NO.160) بود. این ماسه بدون چسبندگی بوده و از معادن شهر فیروزکوه در شمال شرق تهران تأمین می‌شود. شکل (۴)، منحنی توزیع دانه‌بندی ماسه تحت آزمایش را نمایش می‌دهد.

این خاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحده (USCS) در گروه ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی می‌شود. سایر ویژگی‌های خاک در جدول (۱) تعریف شده است. به صورتی که E_s مدول الاستیک خاک ماسه‌ای خشک (مدول یانگ)، v نسبت پواسون،

جدول ۱. پارامترهای خاک ماسه‌ای

E_s (kN/m ²)	v (Poisson's ratio)	ϕ (deg.)	c (kN/m ²)	γ_d (kN/m ³)	γ_{dmin} (kN/m ³)	γ_{dmax} (kN/m ³)
70000	0.3	34	0	14	13.4	16

Table 1. Sandy soil parameters

Code	Mesh Size (mm)	Color	Weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Tensile Strength (kN/m)	Axial Stiffness (kN)
CE 121	6×8	Green	730	3.3	7.68	0.18

Table 2. Geogrid specification

۲-۲- روند آزمایش

برای این پژوهش، ۳۲ آزمایش مختلف در چهار گروه برای شالوده‌های مخروطی و هرمی طراحی شد. این آزمایش‌ها در شرایط مختلف عمق فونداسیون $0 \leq D_f / B \leq 0.5$ (شالوده‌های قرار گرفته بر روی سطح خاک) و $D_f / B = 0.5$ (شالوده‌های مدفون) و در حالت‌های خاک تقویت‌نشده ($D_g / B = \text{none}$) و تقویت‌شده با ژئوگرید ($D_g / B = 0.5$) انجام شن. خلاصه‌ای از شرایط آزمایش‌های انجام شده در جدول (۳) قابل رویت است.

ب) مسلح کننده: در این مطالعه به منظور مسلح سازی خاک، ژئوگریدی با نام تجاری نتلون^۸ و کد اختصاری CE-121 استفاده شده است شکل (۵)، که از پلی‌اتیلن متراکم و با دانسیته بالا^۹ (HDPE) ساخته شده است و دارای مقاومت کششی 7.68 kN/m است. این نوع از ژئوگرید برای نسبت مقاومت به چگالی بالایی که دارد، شناخته می‌شود و در مسلح سازی خاک و تثبیت زمین، مورد استفاده قرار می‌گیرد. سایر مشخصات این مصالح در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل ۵. ژئوگرید نتلون استفاده شده در آزمایش‌ها



Fig 5. CE-121 geogrid used in tests

جدول ۳. خلاصه آزمایش‌های انجام شده

Test Series	D_f / B	D_g / B
9. high-density polyethylene		

جدول ۲. مشخصات فنی ژئوگرید

برای هر آزمایش، یک کد تعریف شده است که پارامترهای اساسی آن تست را تعیین می‌کند. به عنوان نمونه C1-180 به معنی آزمایش‌های سری اول روی شالوده مخروطی با زاویه رأس ۱۸۰ درجه است.

۳- مطالعات عددی

به منظور بررسی سایر شرایط، شامل تاثیر تغییر عمق پی و استفاده از دولایه ژئوگرید ($D_g / B = 1.0$) برای لایه دوم ژئوگرید)، بر ظرفیت برابری فونداسیون‌های پوسته‌ای تحت مطالعه آزمایشگاهی، سایر حالت‌های عنوان شده با کد تعریف شده برای هر مدل، در جدول (۴) با استفاده از تحلیل حدی فرموله شده به روش المان محدود سه بعدی، مدل‌سازی شد.

فرمولاسیون استفاده شده در این تحلیل، تئوری‌های حد بالا و پایین است. درستی آزمایی بر اساس مقایسه مدل‌سازی‌های عددی انجام شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های فیزیکی بوده

1	0	None
2	0.5	None
3	0	0.5
4	0.5	0.5

Table 3. Laboratory tests summary

به صورتی که D_f عمق شالوده و D_g فاصله ژئوگرید از سطح شالوده است. شکل (۶)، شماتیک فونداسیون پوسته‌ای و اندازه‌های D_f و D_g را نمایش می‌دهد.

شکل ۶. شماتیک فونداسیون پوسته‌ای

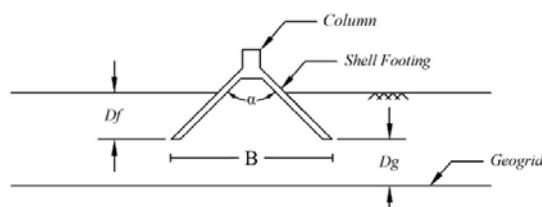


Fig 6. Schematic view of shell foundation

جدول ۴. کدگذاری مدل‌های عددی انجام شده

Types of Foundation	Number of geogrid layers	Apex angle	Foundations depth to width ratio		
			$D_f/B=0$	$D_f/B=0.5$	$D_f/B=1$
Without geogrid		180°	C0-180-D0	C0-180-D0.5	C0-180-D1
		120°	C0-120-D0	C0-120-D0.5	C0-120-D1
		90°	C0-90-D0	C0-90-D0.5	C0-90-D1
		60°	C0-60-D0	C0-60-D0.5	C0-60-D1
Conical	One layer of geogrid	180°	C1-180-D0	C1-180-D0.5	C1-180-D1
		120°	C1-120-D0	C1-120-D0.5	C1-120-D1
		90°	C1-90-D0	C1-90-D0.5	C1-90-D1
		60°	C1-60-D0	C1-60-D0.5	C2-60-D1
	Two layers of geogrid	180°	C2-180-D0	C2-180-D0.5	C2-180-D1
		120°	C2-120-D0	C2-120-D0.5	C2-120-D1
		90°	C2-90-D0	C2-90-D0.5	C2-90-D1
		60°	C2-60-D0	C2-60-D0.5	C2-60-D1
Without geogrid		180°	P0-180-D0	P0-180-D0.5	P0-180-D1
		120°	P0-120-D0	P0-120-D0.5	P0-120-D1
		90°	P0-90-D0	P0-90-D0.5	P0-90-D1
		60°	P0-60-D0	P0-60-D0.5	P0-60-D1
Pyramidal	One layer of geogrid	180°	P1-180-D0	P1-180-D0.5	P1-180-D1
		120°	P1-120-D0	P1-120-D0.5	P1-120-D1
		90°	P1-90-D0	P1-90-D0.5	P1-90-D1
		60°	P1-60-D0	P1-60-D0.5	P1-60-D1
		180°	P2-180-D0	P2-180-D0.5	P2-180-D1

Two layers of geogrid	120°	P2-120-D0	P2-120-D0.5	P2-120-D1
	90°	P2-90-D0	P2-90-D0.5	P2-90-D1
	60°	P2-60-D0	P2-60-D0.5	P2-60-D1

Table 4. Numerical models coding

تحلیل حدی یک روش عددی برای تعریف نهایی باری است که شالوده می‌تواند با توجه به رابطه تنش - کرنش خاک در یک حالت ایده‌آل تحمل کند. تئوری‌های تحلیل حدی یکی از قوی‌ترین روش‌های مهندسی ژئوتکنیک برای تخمین ظرفیت باربری سیستم‌هایی مانند شالوده و تحلیل پایداری سیستم‌هایی مانند دیوارهای حائل، شبیه‌ها و حفاری‌ها است. با استفاده از حد پایین و حد بالا، محدوده‌ای برای گسیختگی پلاستیک یک سیستم به دست می‌آید، بنابراین بار گسیختگی واقعی سیستم در این محدوده است. به عبارت دیگر، این حدود طیف وسیعی از ضربی گسیختگی یک سیستم را تعریف می‌کنند که می‌تواند با محاسبه بیشترین مقدار مرز پایین و حداقل مقدار مرز بالایی کاهش یابد (شکل ۹).

نتیجه نهایی میانگین نتایج حدود بالا و پایین است:

$$\text{Result} \approx \frac{UB + LB}{2} \quad (7)$$

شکل ۹. محدوده تعیین جواب دقیق مسئله

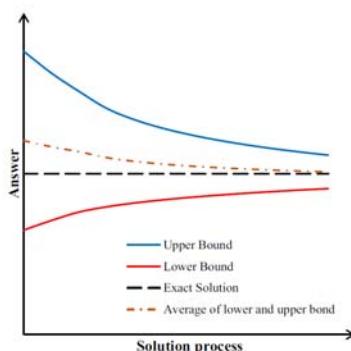


Fig 9. Bounds of definition of exact solution

۱-۳-۱-۱- تئوری حد پایین (LB)

تئوری حد پایین یا قضیه سطح استاتیکی بیان می‌کند که بار گسیختگی حاصل از هر میدان تنش الاستوپلاستیک، تخمین پایین‌تری از نرخ گسیختگی واقعی را فراهم می‌کند. میدان تنش استاتیکی مورد قبول، معادلات تعادل و شرایط مرزی را ارضاء می‌کند و اگر در حالت پلاستیک، وضعیت تنش در تمام نقاط از معیار تسليم بالاتر نباشد، قابل قبول است [15].

است. مقایسه حاصل در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. اختلاف میانگین نتایج حاصل از دو روش استفاده شده برای پی‌های مخروطی $1/47\%$ و برای پی‌های هرمی $23/7\%$ بود که نشان‌دهنده قابل اطمینان بودن روش عددی در محاسبه ظرفیت باربری این گروه از پی‌ها است. علت ایجاد اختلاف بیشتر محاسبه نتایج در پی‌های هرمی آن بود که در زمان اعمال بار، احتمال کج شدنگی پی وجود داشت و با وجود تلاش مضاعف برای جلوگیری از ایجاد این مشکل و تکرار چندین باره آزمایش، باز هم ایجاد اندکی خروج از مرکزیت غیر قابل اجتناب بود، هرچند این خطأ به مقداری نیست که نتایج کلی را تحت تاثیر قرار دهد.

شکل ۷. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با مدل‌سازی فیزیکی برای پی مخروطی

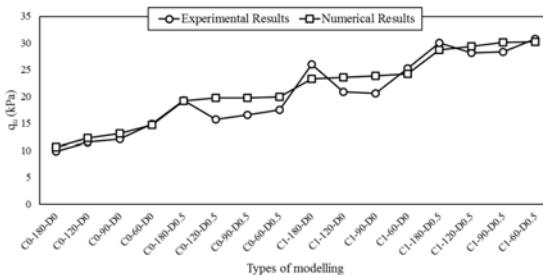


Fig. 7. Comparison of results of numerical modeling with physical modeling for conical foundation

شکل ۸. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با مدل‌سازی فیزیکی برای پی هرمی

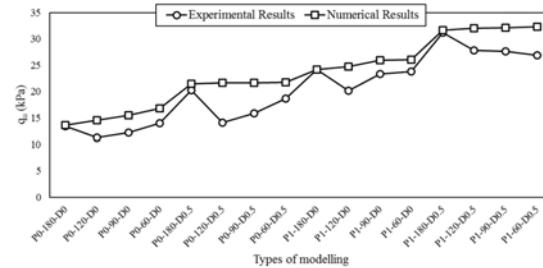


Fig 8. Comparison of results of numerical modeling with physical modeling for pyramidal foundation

۱-۳-۲- تئوری تحلیل حدی

تخمین مناسبی از حد بالا در بار گسیختگی واقعی می‌تواند با مساوی قراردادن معادله W_{int} و نرخ کار انجام شده توسط تمام بارهای خارجی دیگر، حاصل شود:

$$W_{int}^{int} = W^{ext} = \int_S T^T u dS - \int_V X^T u dV \quad (12)$$

برای خاک بدون چسبندگی، هیچ اتلاف انرژی وجود ندارد. در یک مسئله ظرفیت باربری، این بدان معنی است که ظرفیت باربری به طور کامل از وزن خود توده خاک حاصل می‌شود. علاوه بر این، به کمتر رساندن W_{int} به معنای بیشتر کردن W^{ext} است که استفاده کامل از توده خاک زیر پی توسط فونداسیون را تعریف می‌کند.

از آنجایی که یافتن پاسخ تحلیلی برای این مسائل با توجه به هندسه خاص، ویژگی‌های مصالح ناهمگن و الگوهای بارگذاری پیچیده، بسیار دشوار است، استفاده از فرمول عددی که بتواند میدان سرعت را به صورت کلی مدل‌سازی کند، مناسب است. بهترین روش برای این کار، روش المان محدود است. شکل (۱۰) شبکه المان‌بندی و شرایط تنش قائم تحت پی هرمی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰. توزیع تنش قائم در لحظه گسیختگی

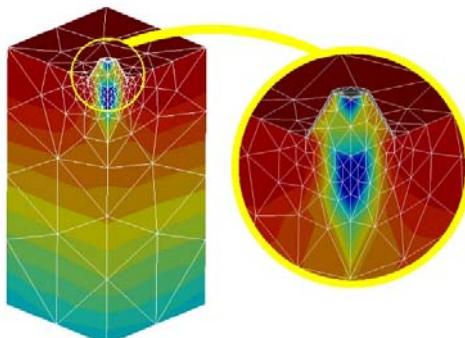


Fig. 10. Vertical stress distribution at failure

۴- نتایج، بررسی و مقایسه‌ها

ظرفیت باربری پی را می‌توان از منحنی بار- جابه‌جاوی بدست آورد. منحنی‌های نرمال شده بار نشست حاصل از نتایج تست‌های آزمایشگاهی در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است.

فرم کلی معادله تعادل در شرایط کرنش صفحه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i = 0 \quad (8)$$

که σ_{ij} و b_i به ترتیب مولفه‌های تانسور تنش و نیروی حجمی هستند. این معادله باید در تمام نقاط دامنه مسئله ارضاء شود. در محدوده پایینی تحلیل حدی، شرایط مرزی قبل از عنوان تنش مرزی تعریف شده است، بنابراین، با فرض اینکه تنش نرمال یا برشی در شرایط مرزی صفر است، شرایط مرزی می‌تواند ارضاء شود، همچنین وضعیت تنش در هیچ نقطه‌ای در دامنه مسئله نباید از معیار تسلیم بیشتر باشد. با توجه به معیار موهر-

کلمب،تابع تسلیم به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$F = (\sigma_{11} + \sigma_{22})^2 - (2c \cos \phi - (\sigma_{11} - \sigma_{22}))^2 \quad (9)$$

که c و ϕ به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک هستند.

شرایط ضروری برای پذیرش میدان تنش پلاستیک به شرح زیر است:

$$F \leq 0 \quad (10)$$

این معادله باید در تمام نقاط دامنه مسئله برآورده شود. در واقع، این معادله، مکان هندسی تمامی نقاطی است که در محیط و درون یک دایره در سطح X-Y قرار دارند که در آن $\sigma_{22} = 2\sigma_{12}$ و $X = \sigma_{11}$ است.

۲-۱-۳- تئوری حد بالا (UB)

تئوری حد بالا یا قضیه سینماتیک که بر اساس مدل پلاستیک كامل برای خاک تعریف شده است، حد بالایی از بار گسیختگی را با برابر قراردادن مقادیر انرژی داخلی مستهلك شده توسط یک میدان سرعت سینماتیکی با کار انجام شده توسط نیروهای خارجی، محاسبه می‌کند. هدف از محاسبه حد بالایی، یافتن تابع سرعتی (u) است که معادلات سازگاری، قانون جریان و شرایط مرزی سرعت را ارضا کند و مقدار استهلاک نیروی داخلی و نرخ کار انجام شده توسط نیروهای بیرونی را حداقل کند [16].

$$W^{int} = \int_V \sigma \dot{e} dV - \int_S T_{PRS}^T u dS - \int_V X_{PRS}^T u dV \quad (11)$$

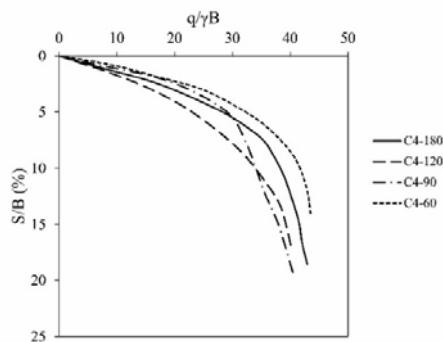
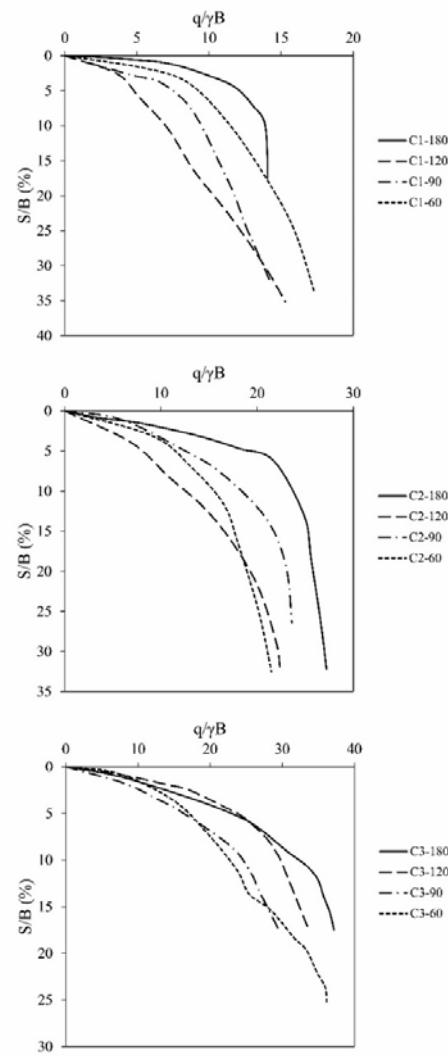
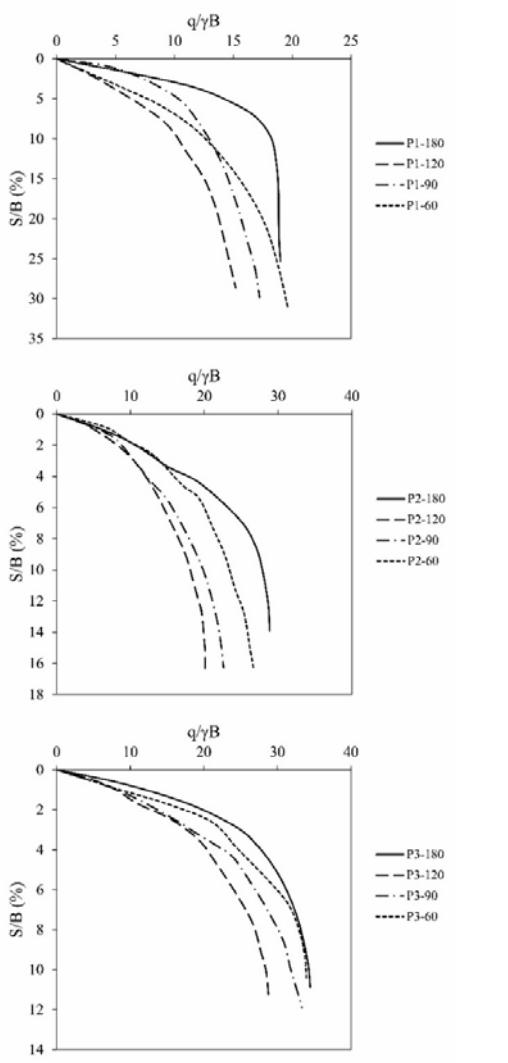


Fig. 11. Normalized load-settlement curves observing laboratory results for conical foundations

مطابق آنچه که در شکل مشاهده می‌شود استفاده از شالوده‌های پوسته‌ای در ماسه سست برای حالتی که اصطکاک بین خاک و پی زیاد است نمی‌تواند ظرفیت باربری را چندان افزایش دهد و فقط ظرفیت باربری فونداسیون پوسته‌ای با زاویه رأس ۶۰ درجه و مستقر بر سطح خاک در ماسه تقویت نشده، بالاتر از همتای مسطح خود است. همچنین مشاهده می‌شود که استفاده از شالوده‌های پوسته‌ای، تنها در شرایط استقرار شالوده در سطح خاک می‌تواند ظرفیت باربری را بهبود ببخشد و برای فونداسیون‌های مدفون، بار نهایی قابل تحمل توسط شالوده‌ای پوسته‌ای و مسطح نزدیک هستند.

شکل ۱۱. منحنی بار- نشت نرمال شده حاصل از نتایج آزمایشگاهی برای بی هرمی مخروطی



مخروطی دارد. این رفتار توسط ترازاقی برای فونداسیون‌های دایره‌ای و مربعی نیز پیش‌بینی شده است.

شکل ۱۳. مقایسه نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی برای پی‌های هرمی و مخروطی

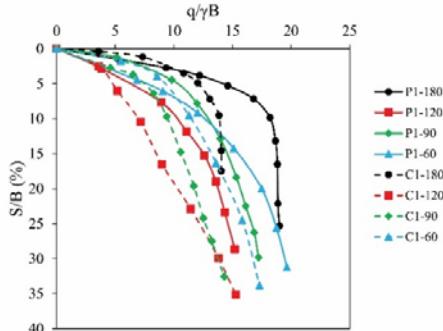


Fig. 13. Comparison of results of laboratory investigation for pyramidal with conical foundations

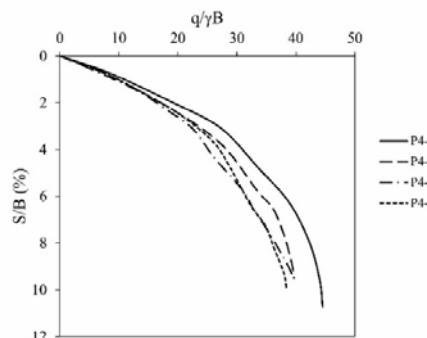


Fig. 12. Normalized load-settlement curves observing laboratory results for pyramidal foundations

منحنی بار-نشست نشان می‌دهد که عملکرد ژئوتکنیکی شالوده‌ها پس از استقرار ژئوگرید بهبود می‌یابد. شکل (۱۳) به منظور مقایسه عملکرد ژئوتکنیکی شالوده‌های مخروطی و هرمی در ماسه‌های تقویت نشده ترسیم شده است. قابل رویت است که پی‌های هرمی عملکرد بهتری نسبت به فونداسیون‌های

جدول ۵. ظرفیت باربری (kPa) پی‌های پوسته‌ای حاصل از مدل‌سازی عددی

Types of Foundation	Number of geogrid layers	Apex angle	Foundations depth to width ratio		
			D _r /B=0	D _r /B=0.5	D _r /B=1
Without geogrid		180°	10.57	19.23	26.82
		120°	12.28	19.76	26.93
		90°	13.09	19.79	26.95
		60°	14.66	19.94	27.04
Conical	one layer of geogrid	180°	23.34	28.69	33.17
		120°	23.6	29.41	33.19
		90°	23.88	30.13	33.23
		60°	24.2	30.26	33.27
Two layers of geogrid		180°	24.39	28.88	33.93
		120°	24.45	30.89	33.96
		90°	24.5	30.91	33.96
		60°	24.51	30.92	33.99
Without geogrid		180°	13.56	21.47	28.75
		120°	14.51	21.63	28.84
		90°	15.5	21.61	28.93
		60°	16.79	21.73	29.04
Pyramidal	One layer of geogrid	180°	24.14	31.7	38.51
		120°	24.77	32.02	38.53
		90°	25.94	32.17	38.65
		60°	26.09	32.33	38.68
	Two layers of geogrid	180°	26.19	32.93	38.82
		120°	26.24	32.95	38.85
		90°	26.25	33.02	38.85

	60°	26.29	33.04	38.87
Table 5. Bearing capacity (kPa) of shell foundations resulting of numerical modeling				

افزایش عمق پی به اندازه $D_l/B=0.5$ ، مقدار ظرفیت باربری برای شالوده‌ها با زاویه رأس 120° ، 90° و 60° را به طور میانگین به ترتیب 40 ، 36 و 28 درصد و افزایش عمق پی به اندازه $D_l/B=1.0$ به ترتیب 76 ، 77 ، 61 و 55 درصد افزایش می‌دهد.

۳. افزایش ظرفیت باربری با افزایش عمق مدفون پی، برای حالتی که خاک غیرمسلح باشد بیشتر خواهد بود. نتایج نشان دادند که میانگین افزایش ظرفیت باربری برای شالوده‌های مستقر روی خاک غیرمسلح در حالتی که $D_l/B=0.5$ برابر 50 درصد و برای خاک مسلح با یک لایه و دو لایه ژئوگرید به ترتیب برابر 26 و 24 درصد است. برای $D_l/B=1.0$ ، مقدار افزایش ظرفیت باربری برای سه حالت مذکور به ترتیب 46 ، 43 و 40 درصد است.

۴. استفاده از شالوده پوسته‌ای فقط در شرایطی که پی روی سطح خاک غیرمسلح قرار گرفته باشد موجب افزایش ظرفیت باربری خواهد شد. این افزایش ظرفیت باربری برای شالوده‌ها با زاویه رأس 120° ، 90° و 60° به طور میانگین به ترتیب برابر با 11 ، 19 و 31 درصد خواهد بود. در صورت دفن پی و یا استفاده از ژئوگرید، با کاهش زاویه رأس، تغییر محسوسی در ظرفیت باربری مشاهده نمی‌شود.

۵. استفاده از یک لایه ژئوگرید ظرفیت باربری شالوده‌های قرار گرفته روی سطح خاک را به طور میانگین 79 درصد افزایش داد در حالی که استفاده از دو لایه ژئوگرید ظرفیت باربری را 86 درصد افزایش می‌دهد که این موضوع نمایانگر این واقعیت است که استفاده از دو لایه ژئوگرید موجب بهبود چشمگیر ظرفیت باربری نسبت به حالتی که خاک با یک لایه ژئوگرید مسلح می‌شود، خواهد شد. ظرفیت باربری شالوده مدفون با $D_l/B=0.5$ و یک لایه ژئوگرید 50 درصد و با دو لایه ژئوگرید 53 درصد و برای شالوده‌های مدفون با $D_l/B=1.0$ و یک لایه ژئوگرید 28 درصد و با دو لایه ژئوگرید 30 درصد بیش از شالوده‌های قرار گرفته روی سطح خاک غیرمسلح خواهد بود. این امر بیان می‌دارد که تاثیر استفاده از مسلح‌کننده در

مقادیر ظرفیت باربری محاسبه شده با استفاده از روش عددی در جدول (۵) قابل مشاهده است. همان‌گونه که پیش‌بینی شد با کاهش زاویه رأس پی، به علت توسعه سطح گسیختگی زیر پی، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. با توجه به آنکه در شرایطی که پی مدفون باشد، گوه گسیختگی از شرایطی که شالوده روی سطح زمین قرار دارد، بزرگتر است، کاهش زاویه رأس کمک چندانی به افزایش ظرفیت باربری نخواهد کرد زیرا جبس خاک در زیر سطح زمین اتفاق می‌افتد و بنا براین گوه گسیختگی تغییر محسوسی نخواهد کرد. استفاده از ژئوگرید در فاصله کمتر از عرض شالوده در زیر پی، سطح گسیختگی را تحت تاثیر قرار خواهد داده و موجب عمیق‌تر شدن آن خواهد شد. در این حالت نیز کاهش زاویه رأس، سطح گسیختگی را چهار تغییر نخواهد کرد، به صورتیکه خط گسیختگی پس از عبور از ژئوگرید، هماهنگی با خط گسیختگی ناشی از گسیختگی شالوده مسطح مشابه خواهد بود. به نظر می‌رسد این شرایط برای سایر پی‌های پوسته‌ای نیز قابل تعمیم خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

ظرفیت باربری و نشست شالوده‌های مخروطی و هرمی با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به شکل منحنی‌های بار - نشست و جداول مقایسه‌ای نمایش داده شد. هرچند مقادیر محاسبه شده برای حالات خاصی از شرایط پی و خاک عنوان شده در این مطالعه بدست آمده است اما می‌توان آنها را نشانگر رویکرد کلی این گروه از فونداسیون‌ها در نظر گرفت و برای حالات کلی نیز تعمیم داد.

۱. به منظور تعیین ظرفیت باربری این گروه از شالوده‌ها می‌توان از روش تحلیل حدی بهره برد. این روش مقادیر باربری این فونداسیون‌ها را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند.

۲. به طور کلی افزایش عمق پی و استفاده از ژئوگرید به افزایش ظرفیت باربری شالوده‌ها منجر می‌شود، هرچند این افزایش در شالوده‌های مسطح مشهودتر است، به طوری که

- [7] Rinaldi R., Abdel-Rahman M. & Hanna A. 2017 Experimental investigation on shell footing models employing high-performance concrete. *GeoMEast: Facing the Challenges in Structural Engineering*, Egypt.
- [8] Kazemi, M., & Bazaz, J. B. 2018 Ultimate Bearing Capacity of Composite Shell Annular Foundations in Cohesionless Soil. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4), 781-792
- [9] Kumar M., Subagiriraj M. 2019 Experimental investigation of various shell footings in cohesive and cohesionless soil, *International Journal of Civil, Environmental and Agricultural Engineering*, Vol. 1, Issue. 1, 67-77.
- [10] Kurian N.P. & Devaki V.M. 2005 Analytical studies on the geotechnical performance of shell foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, 562-573.
- [11] Yamamoto K., Lyamin A.V., Abbo A.J., Sloan S.W. & Hira M. 2009 Bearing capacity and failure mechanism of different types of foundations on sand. *Soils and Foundations*, 49 (2), 305-314.
- [12] Hassan, S. A., Al-Soud, M. S., & Mohammed, S. A. 2019 Behavior of Pyramidal Shell Foundations on Reinforced Sandy Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 2437-2452.
- [13] Ebrahimi K. & Khazaei J. 2019 Investigation of bearing capacity and failure pattern in shell foundations by FELA method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37 (4), 3523-3534.
- [14] Ghaffari S. A., Hamidi A., & Mehrjardi Gh. T. 2021 Bearing Capacity of Triangular Shell Foundations Adjacent to the Reinforced Sandy Slopes *Journal of Engineering Geology*, Vol. 14, winter
- [15] Sloan S.W. 1988 Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol. 12, 61-77.
- [16] Sloan S.W. 1989 Upper bound limit analysis using finite elements and linear programming. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol. 13, 263-282.
- شالوده‌های مدفون کمتر است، همچنین از اثرگذاری استفاده از دولایه ژئوگرید در شالوده‌های مدفون به مراتب کاسته می‌شود.
۶. استفاده از ژئوگرید ظرفیت باربری شالوده‌های مسطح را بیش از شالوده‌های پوسته‌ای افزایش می‌دهد. برای شالوده قرار گرفته روی سطح خاک با زوایای رأس 180° , 120° , 90° و 60° استفاده از یک لایه ژئوگرید به طور میانگین ظرفیت باربری را به ترتیب $81, 99, 75$ و 60 درصد و استفاده از دو لایه ژئوگرید به ترتیب $110, 90, 78$ و 62 درصد افزایش می‌دهد. این شرایط برای پی‌های مدفون کمتر محسوس بوده و مقدار افزایش ظرفیت $D_f/B=0.5$ باربری برای پی‌ها با تمام زوایای رأس برای حالت حدود 50 درصد و برای حالت $D_f/B=1.0$ حدود 29 درصد است. استفاده از دولایه ژئوگرید بر پی‌های با زوایای رأس کمتر، تاثیر کمتری خواهد داشت.
۷. به طور کلی عملکرد ژئوتکنیکی شالوده هرمهی بهتر از همتای مخروطی آن است.

مراجع

- [1] Mosallanezhad M., Bazyar M.H. & Farogh A. 2015 A numerical study on bearing capacity of ring and circular foundations on granular soils reinforced by grid-anchor system. *Modares Civil Engineering journal*, 14 (4), 127-136. (In Persian)
- [2] Nicholls R.L. & Izadi M.V. 1968 Design and testing of cone and hypar footings. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol. 94, 47-72.
- [3] Iyer T.S. & Rao N.R. 1970 Model studies on funicular shells and rafts on sands. In *Proceedings of the Symposium on Shallow Foundations*, Mumbai, India.
- [4] Kurian N.P. & Jeyachandran S.R. 1972 Model studies on the behavior of sand under two and three dimensional shell foundations. *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 2, No. 1, 79-90.
- [5] Agarwal K.B. & Gupta R.N. 1977 Soil-structure interaction in shell foundation. *International Workshop on Soil Structure Interaction*, Roorkee, India.
- [6] Hanna A. & Abdel-Rahman M. 1998 Experimental investigation of shell foundation on dry sand. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, 847-857.

Geotechnical performance of shell foundations on unreinforced and reinforced sandy soils

Kamran Ebrahimi¹, Sayed Mohmmadamin Nematpour ², Jahangir Khazaie³

1. PhD graduate, Razi University

2. Master graduate, Razi University

3. Associate Professor of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

j.khazaie@razi.ac.ir

Abstract

This study presents the experimental results and numerical analyzes on the conical and pyramidal shell foundations located on loose unreinforced and reinforced with geogrid sand. The results have been compared with the values studied for flat circular and square foundations. Laboratory studies were performed on different types of shell foundations with different apex angles using small-scale physical modeling. In order to extend of study for determination of the effect of various conditions of foundation's depth to width ratio and the number of geogrid layers on bearing capacity ratio, numerical analyses have been done by limit analysis method. The results have shown that, in general, increasing the depth of the foundations and the use of reinforcing structures ameliorate the geotechnical performance of foundations in both flat and shell models, although this enhancement is more evident in plane foundations. The load bearing capacity for the foundations with 180°, 120°, 90°, and 60° apex angles is put up to 40%, 36%, 32%, and 28%, respectively by rising in the foundation depth to $D_f/B=0.5$, and is raised to 76%, 67%, 61%, and 55%, respectively by the growth of the foundation depth to $D_f/B=1.0$. The use of geogrids increases the bearing capacity of plane foundations more than the shell foundations. The use of a single geogrid layer increased the bearing capacity of the foundations on the soil surface by an average of 79%, while the use of two layers of geogrid increased the bearing capacity by 86%, reflecting the fact that the use of two layers of geogrid will not significantly improve the bearing capacity in comparison to the condition when the soil is reinforced with a single geogrid layer. Bearing capacity of buried foundations with $D_f/B=0.5$ is increased to 50% and 53% by using a single geogrid layer and double geogrid layer, respectively, and with $D_f/B=1.0$ is increased to 28% and 30% by using a single geogrid layer and double geogrid layer, respectively, in comparison to foundations which are built on surface unreinforced soil. For foundations on the soil surface with 180°, 120°, 90°, and 60° apex angles, using a single geogrid layer increases the average bearing capacity to 99%, 81%, 75%, and 60%, respectively, and the use of two layers of geogrid increases to 110%, 90%, 78%, and 62%, respectively. These conditions are less pronounced for buried foundations and the increase in load bearing capacity for footings with all apex angles is about 50% for $D_f/B=0.5$ and 29% for $D_f/B=1.0$. The use of two layers of geogrid will have less impact on the foundations with smaller apex angles.

Keywords: Bearing capacity, Settlement, Conical and pyramid shell foundations, Geogrid, Reinforced sand