

تأثیر مسلح کننده ژئوسل بر طراحی پی ماشین آلات تحت بار غیرمتمقارن

سعید غفارپور جهرمی

محمود بیات

گروه آموزشی مهندسی ژئوتکنیک و آب، دانشکده مهندسی عمران

دانش آموخته مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

saeed_ghf@sru.ac.ir

mahmoodbayat@rocketmail.com

چکیده

پی ماشین آلات علاوه بر بارهای استاتیکی ناشی از وزن ماشین و پی، تحت بارهای دینامیکی ناشی از عملکرد ماشین نیز می‌باشند. در طراحی پی ماشین آلات وزن پی می‌تواند تا چندین برابر وزن ماشین باشد لذا بار دینامیکی ناشی از حرکت ماشین در مقایسه با بار استاتیکی مقدار بسیار کوچکی دارد که بصورت نوسانی و با فرکانس مشخص اعمال می‌شود. در صورتیکه فاصله بین دو ماشین نزدیک باشد، طراحی پی بایستی با لحاظ کردن تأثیر آنها بر یکدیگر انجام پذیرد. یکی از معیارهای کنترل کننده در طراحی پی ماشین آلات، تنش و تغییر شکل‌های حاصل از حرکت ماشین می‌باشد که بایستی در محدوده مجاز مصالح و عملکرد ایمنی دستگاه قرار گیرند. در این راستا استفاده از مسلح کننده سه بعدی ژئوسل می‌تواند بسیار کاربرد داشته باشد که با توجه به ساختار سلولی شکل خود و تأمین محصور شدگی لازم برای خاک درون سلول‌ها، عملکرد بسیار مناسبی از لحاظ افزایش ظرفیت باربری در مقایسه با مسلح کننده‌های مسطح دارد. در این تحقیق مدلسازی پی حجیم توربین‌های بخار تحت بارگذاری نامتمقارن واقع بر خاک مسلح شده در مقیاس واقعی مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن ژئوسل با ابعاد هندسی مختلف و در موقعیت متفاوت قرار گرفته‌اند. در تحلیل عددی از نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC-3D* استفاده شده تا پاسخ و رفتار تنش و تغییر شکل آن مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع ژئوسل و نیز افزایش تعداد چشمه در واحد سطح، تنش وارد بر خاک کاهش یافته و بعبارتی ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. همچنین افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل تا حدی بر ظرفیت باربری مؤثر بوده اما تأثیر قابل توجهی در کاهش دامنه نوسانات و کرنش تجمعی خاک زیر پی و جابجایی بین هر دو پی دارد. نتایج نشان دادند انتخاب مناسب و بهینه تعداد لایه‌ها و فاصله بین آنها، تأثیر محسوسی بر عملکرد پی ماشین آلات در شرایط کارکرد غیرهمفاز و غیرمتمقارن دارد و به فاصله ایمن بین دو دستگاه وابسته است.

واژه‌های کلیدی: فونداسیون، ماشین آلات، بار سیکلی، بارگذاری نامتمقارن، ژئوسل.

The effect of geocell reinforcement on design of foundation with asymmetric load

Saeed Ghaffarpour Jahromi^{1*} and Mahmoud Bayat²

Abstract

The foundation of machines is subjected to the weight of the machine and the foundation as well as to the dynamics due to the performance of the machine. In the design of machine foundations, the weight of the foundation can be several times the weight of the machine, so the dynamic load due to the movement of the machine is very small compared to the static load, which is applied cyclically and with a certain frequency. If the distance between the two machines is close, the foundation design should be done taking into account their effect on each other. One of the control criteria in the design of machine foundations is the stress and deformations resulting from the movement of the machine, which must be within the allowable range of materials and safety performance of the machine. In this regard, the use of three-dimensional geocell reinforcement can be very useful, which due to the three-dimensional cell structure with soil confinement, has a very good performance in terms of increasing bearing capacity compared to flat reinforcements. In this research, large-scale modeling of steam turbine under asymmetric loading located on reinforced soil has been studied in real scale, in which geocells with different geometric dimensions and in different levels have been placed. In numerical analysis, *FLAC-3D* finite difference software is used to evaluate the stress response and behavior and its deformation. The results of this study show that with increasing the geometry and height of the geocell and also increasing the number of cells per unit area, the stress on the soil decreases and in other words, the bearing capacity increases. Also, increasing the number of geocell layers has some effect on bearing capacity, but has a significant effect on reducing the cyclic amplitude and cumulative strain of the soil under the foundation and the displacement of both foundations. The results showed that the appropriate and optimal selection of the number of layers and the distance between them has a significant effect on the performance of machine foundations in asymmetric and asymmetric operating conditions and depends on the safe distance between the two devices.

Keywords: Machine foundation, cyclic load, asymmetric loading, geocell, reinforcement.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷

تاریخ آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹

۱- مقدمه

دامنه حرکات سیکیلی یک ماشین در محدوده فرکانسی که کار می‌کنند یکی از مهمترین فاکتور هایی است که در طراحی پی ماشین‌آلات باید تعیین گردد. همچنین فرکانس طبیعی سیستم شامل زمین، پی و ماشین نیز لازم است به اندازه کافی از فرکانس کار ماشین دور باشد. بررسی این عوامل به شناخت همه جانبه رفتار خاک وابسته است چرا که نقش موثری در تحلیل و طراحی واقع‌گرایانه دارد. رفتار خاکها تحت تاثیر میدان‌های استاتیکی از دیرباز مورد مطالعه محققان قرار داشته است اما رفتار خاک تحت بارهای دینامیکی، بدلیل پیچیدگی مسائل و گستردگی موضوعات دینامیکی، علیرغم تحقیقاتی که تا بحال صورت گرفته است هنوز نیاز به مطالعات بیشتری در جهت شناخت رفتار واقعی خاک احساس می‌شود. زندگی متمدن و پیشرفته شهری و نیازهای گوناگون به محصولات صنعتی باعث افزایش تعداد کارخانه‌های صنعتی و در نتیجه تعداد ماشین‌آلات مورد نیاز گردیده است که طراحی پی این ماشین‌آلات نیازمند بررسی‌های ویژه است چرا که علاوه بر بارهای استاتیکی ناشی از وزن ماشین‌آلات و خود پی، بارهای ناشی از بهره‌برداری ماشین ماهیت دینامیکی دارند که باید تنش وارد بر خاک و تغییر شکل منتج از آن در محدود الاستیک باشد تا از تغییر شکل‌های تجمعی زیاد اجتناب شود. در این راستا استفاده از خاک مسلح می‌تواند بسیار کارگشا باشد و دامنه نوسانات ماشین و همچنین تغییر شکل‌ها را کاهش داده و باعث افزایش ظرفیت باربری پی بخصوص تحت بارگذاری‌های مختلف دینامیکی گردد. امروزه از مسلح‌کننده‌های مختلفی در تسلیح خاک استفاده می‌شود که از لحاظ جنس، مقطع، ابعاد هندسی و عملکرد ساختاری بسیار متفاوت می‌باشند. در چند دهه اخیر استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در مهندسی ژئوتکنیک کاربرد فراوانی داشته است که در بین آنها استفاده از ژئوسل در تسلیح خاک‌های غیرچسبنده و دانه‌ای بسیار متداول می‌باشد. ژئوسل از مواد پلیمری پر دوام ساخته شده و ساختار هندسی سه بعدی دارد که به راحتی قابل حمل بوده و در تثبیت شیب‌های خاکی و دیوارهای حائل مورد استفاده است.



شکل ۱: نمونه شکل ژئوسل



شکل ۲: ژئوسل سوراخدار ساخته شده از پلیمر

تا کنون تحقیقات زیادی روی خاک‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک‌ها جهت بررسی ظرفیت باربری تحت بار استاتیکی و دینامیکی انجام شده است اما این تحقیقات در خاک‌های مسلح شده با ژئوسل و تحت بار پی ماشین‌آلات محدود بوده است.

بینکویت و همکارانش از اولین محققانی بودند که در سال ۱۹۷۵ تحقیقات مفصلی بر روی ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی روی خاک مسلح انجام دادند. بررسی آنها نشان داد گسیختگی خاک مسلح تحت بارگذاری پی به چند حالت شامل گسیختگی برشی خاک بالای اولین لایه مسلح‌کننده، گسیختگی ناشی از بیرون کشیدگی مسلح‌کننده‌ها، گسیختگی کششی مسلح‌کننده‌ها و همچنین گسیختگی ناشی از تغییر شکل بیش از حد در بلند مدت (خزش) اتفاق می‌افتد [۱].

میاژکی و همکارانش در سال ۱۹۹۲ ظرفیت باربری و میزان نشست نوعی ماسه مسلح‌شده با ژئوگرید را با مدلسازی فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آنها بیانگر تاثیر محسوس مسلح‌کننده بر کاهش نشست می‌باشد [۲]. هانگ و همکارانش (۱۹۹۷) در یک تحقیق آزمایشگاهی، ظرفیت باربری و مکانیسم شکست خاک ماسه مسلح شده با المانهای کششی در زیر پی را مورد بررسی قرار داد که نتیجه آن تغییر مکانیسم گسیختگی و افزایش قابل توجه ظرفیت باربری با مسلح‌سازی می‌باشد [۳]. براجا ام داس در کتاب معروف خود با عنوان اصول مهندسی ژئوتکنیک (جلد اول) اشاره کرده است که عمق بهینه قرارگیری مسلح‌کننده ژئوگرید در زیر پی ۱/۳۳ عرض پی و طول بحرانی ژئوگرید در زیر پی ۴ برابر عرض پی باید باشد و وجود مسلح‌کننده باعث کاهش محسوس نشست پی تحت بار گذرا و سیکیلی می‌شود [۴]. تحقیقات داش و همکارانش در سال ۲۰۰۱ نشان می‌دهد که با افزایش عرض مسلح‌کننده تا ۶ برابر عرض پی، ظرفیت باربری تحت یک نشست مشخص افزایش می‌یابد. همچنین این افزایش تحت تاثیر ضخامت و عمق استقرار مسلح‌کننده نیز می‌باشد بطوریکه با افزایش عمق استقرار به بیش از ۲ برابر، تاثیر آن کاهش می‌یابد [۵].

در سال ۲۰۰۷ مدهاوی و همکارانش تحقیقات جامع و مفصلی جهت بررسی تاثیر شکل مسلح‌کننده بر رفتار خاک ماسه مسلح شده

داد ژئوسل بدون سوراخ عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. عمق بهینه یک دهم عرض پی بوده که با افزایش عرض نشست پی نیز کاهش می‌یابد. در تمام آزمایش ۳۵ تا ۶۰ درصد کل نشست در ۱۰ سیکل اول رخ می‌دهد [۱۰].

همچنین آنها در تحقیقات تکمیلی خود (۲۰۱۴) پس از آزمایش‌های متعدد به این نتیجه رسیدند که عمق بهینه جاسازی و فاصله قائم بهینه لایه‌های ژئوسل ۰/۲ قطر پی می‌باشد. ترکیب لایه‌های ژئوسل و خاک مخلوط با خرده لاستیک بیشترین تاثیر را در کاهش در تغییر شکل در مقایسه با خاک بدون خرده لاستیک تحت بار سیکیلی دارد بطوریکه با ۳ لایه ژئوسل، تغییر شکل پلاستیک و دائم حدود ۴۲ درصد افت پیدا می‌کند [۱۱]. در سال ۲۰۱۵ مقدس تفرشی و همکارانش مطالعاتی روی نشست پی‌های مدور مستقر بر خاک غیرچسبنده و مسلح شده با چند لایه ژئوسل انجام دادند که نتایج آنها نشان داد رابطه نشست - فشار در هر دو شرایط مسلح و غیرمسلح بصورت غیرخطی است. این رفتار تحت تاثیر مدول سکانت خاک، سختی ژئوسل، فاصله و تعداد لایه‌های ژئوسل دارد [۱۲]. همچنین در سال ۲۰۱۶ مقدس تفرشی و همکارانش بررسی آزمایشگاهی و عددی خاک مخلوط با پودر لاستیک و مسلح شده با ژئوسل را مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. ایسیک و گوربوز در سال ۲۰۲۰ در مقیاس بزرگ آزمایشگاهی، رفتار بیرون کشش ژئوسل در تسلیح خاک چسبنده را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق سهم هر سلول از نیروی کششی مورد بررسی قرار گرفت و روابط نظری پیشنهاد گردید [۱۴]. چودھاری و داش در یک مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی، تاثیر دانسیته و تراکم خاک ماسه را بر عملکرد مسلح سازی ژئوسل مورد تحقیق قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش تراکم خاک، حجم بیشتری از توده در برابر بار بسیج خواهند شد [۱۵]. خر سندی و قضاوی در یک تحقیق عددی، پایداری استاتیکی شیروانی‌های خاکی مسلح شده با ژئوسل را به روش قطعات افقی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد ضریب پایداری به هندسه شیب، مشخصات هندسی و ابعادی مسلح کننده و همچنین مشخصات مصالح وابسته است [۱۶]. در جمع‌بندی تحقیقات قبلی باید به این نکته اشاره کرد که استفاده از مسلح کننده ژئوسل، بیشتر برای تقویت و مسلح سازی تحت بار استاتیکی مورد توجه قرار گرفته است در حالیکه در این تحقیق به تاثیر این مسلح کننده تحت بار سیکیلی و دینامیکی وارد بر پی ماشین آلات پرداخته می‌شود.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق به منظور ارزیابی تاثیر ژئوسل بر ظرفیت باربری پی ماشین‌آلات تحت بارگذاری نامتقارن، از مدلسازی عددی فونداسیون

با ژئوسنتیک انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که در شرایط غیر مسلح، هر چه فشار محصورشدگی بیشتر شود تحت یک کرنش ثابت، نمونه برای شکست به تنش انحرافی بیشتری نیاز دارد. همچنین ژئوسل بیشترین تاثیر را در بهبود مقاومت خاک دارد بطوریکه بعد از رسیدن به نقطه اوج مقاومت، موقعیت خود را حفظ کرده و با افزایش کرنش، کاهش تنش انحرافی شکست را باعث نمی‌شود [۶].

پوخارل و همکارانش در سال ۲۰۰۹ عوامل تاثیرگذار بر رفتار بسترهای مسلح شده با ژئوسل منفرد تحت بارگذاری استاتیکی را مورد بررسی قرار دادند. ایجاد محدودیت و محصوریت خاک توسط سلول ژئوسل در مقایسه با دیگر مسلح کننده‌ها، شرایط بهتری جهت پخش و هدایت گسترده نیرو در لایه‌های زیرین خاک ایجاد می‌کند بطوریکه یک سلول ژئوسل منفرد به شکل دایره، ظرفیت باربری بالاتری نسبت به ژئوسل بیضوی ایجاد می‌کند و هرچه مدول الاستیک و سختی ژئوسل بیشتر باشد، ظرفیت باربری بستر مسلح شده نیز افزایش می‌یابد. ژئوسل منفرد محصور نشده می‌تواند به راحتی در راستا جانبی منبسط شده و نیروی بیشتری را تحمل کند. بررسی خرابی ژئوسل محصور شده به گونه‌ای است که از محل جوش دچار گسستگی و خرابی می‌شوند در حالیکه ژئوسل محصور شده تحت فشار برکنش از خاک جدا شده و خاک پُر شده در داخل ژئوسل از زیر خالی می‌شود [۷].

مقدس تفرشی و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با استفاده از یک مدل فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی، رفتار پی‌های مربعی روی خاک مسلح شده با ژئوسل تحت بار استاتیکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد با تسلیح بیش از دو لایه ژئوتکستایل و یا ژئوسل با ارتفاع بیش از ۰/۶۶ عرض پی، گسیختگی در خاک زیر پی مشاهده نمی‌شود [۸].

همچنین در تحقیق دیگر توسط تفرشی و همکارانش، ظرفیت باربری شالوده نواری بر روی خاک مسلح شده با ژئوسل و ژئوتکستایل صفحه‌ای مورد مقایسه و مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد وجود لایه ژئوسل در خاک باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست شالوده می‌شود بطوریکه میزان تورم رخ داده در خاک مسلح شده با ژئوسل کمتر از خاک مسلح شده با ژئوتکستایل صفحه‌ای می‌باشد. عمق بهینه دفن ژئوتکستایل صفحه‌ای ۰/۳۵ عرض پی و ژئوسل ۰/۱ عرض پی می‌باشد و افزایش ابعاد ناحیه مسلح شده برش از ۴/۲ عرض پی عملاً تاثیری در ظرفیت باربری و نشست نهایی ندارد. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد برای ظرفیت باربری مشخص به حجم کمتری از ژئوسل در مقایسه با ژئوتکستایل صفحه‌ای نیاز می‌باشد [۹].

در تحقیق دیگری توسط مقدس تفرشی و همکارانش (۲۰۱۲)، عملکرد انواع ژئوسل مورد بررسی قرار گرفت بطوریکه نتایج آنها نشان

شدن ابعاد مدل می‌شود. در مدل‌سازی نرم افزار *FLAC-3D* پارامترهای سطح مشترک جدید (*Interface*) با توجه به مشخصات پی و خاک در جدول ۵ آمده است.

جدول ۴: مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوسل

| مشخصه | مقدار | واحد |
|-----------------|-------|----------|
| وزن مخصوص | ۹/۵ | kN/m^3 |
| مدول الاستیسیته | ۵۵۰ | MPa |
| ضریب پواسون | ۰/۴۵ | - |
| تنش جاری شدن | ۲۳ | MPa |

جدول ۵: مشخصات سطح مشترک (*Interface*) در مدل‌سازی

| مشخصه | مقدار | واحد |
|-------------------|-------|-----------|
| زاویه اصطکاک برشی | ۲۸ | درجه |
| چسبندگی برشی | ۵۶ | MPa |
| سختی نرمال | ۵۰۰۰ | $MPa/m/m$ |
| سختی برشی | ۲۶۰۰ | $MPa/m/m$ |

برای شبیه سازی بارگذاری توربین بخار از یک بار نوسانی هارمونیک سینوسی مطابق دستورالعمل طراحی این توربین‌ها ارائه شده تو سطر شرکت توسعه و ساخت نیروگاه‌های حرارتی "گروه مپنا" استفاده می‌شود [۱۷]. بارگذاری در سه جهت مطابق روابط زیر بر فونداسیون اعمال می‌شود و برای ایجاد بارگذاری بصورت نامتقارن، دو دستگاه بصورت غیر هم فاز به کار گرفته می‌شوند.

$$Q_x = 9.72 \sin(\omega t) \quad \text{مؤلفه افقی در جهت X}$$

$$Q_y = 12.74 \sin(\omega t) \quad \text{مؤلفه افقی در جهت Y}$$

$$Q_z = 12.34 \sin(\omega t) \quad \text{مؤلفه افقی در جهت Z}$$

در روابط فوق Q مؤلفه نیرو بر حسب مگاپاسکال، ω فرکانس زاویه‌ای و t زمان می‌باشند. در تمام مدل‌سازی‌ها، فرکانس بار معادل ۸۷/۵ هرتز در نظر گرفته شده است.

۳- اعتبار سنجی و صحت سنجی نتایج مدل عددی

به منظور ارزیابی دقت و صحت فرآیند مدل‌سازی و تحلیل عددی در نرم‌افزار، نتایج حاصل از این تحقیق با اطلاعات آزمایش روی مدل فیزیکی مندرج در مقاله دکتر تفرشی و همکارانش (۲۰۱۴) مورد مقایسه قرار گرفت [۱۱]. در این مقاله نمودار تغییرمکان پی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری در شرایط مختلف بدون ژئوسل، با یک لایه ژئوسل و با

توربین‌های بخار و در مقیاس واقعی استفاده شده است. این فونداسیون‌ها مطابق با مشخصات فنی و اطلاعات استخراجی شرکت توگا (گروه مپنا) دارای ابعاد $22 \times 8 \times 2$ متر و عمق استقرار آنها ۴۰ سانتیمتر می‌باشد. ابعاد مدل سه برابر ابعاد پی در نظر گرفته می‌شود. وزن و فرکانس حرکت توربین بخار در جدول ۱ بیان شده است. در این تحلیل از مدل رفتاری موهر کولمب برای خاک و مدل رفتاری الاستیک برای بتن استفاده شده است که مشخصات مدل رفتاری مصالح در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: خصوصیات ماشین توربین بخار [۱۷]

| مشخصه | نماد | مقدار | واحد |
|---------------|-------|-------|------|
| وزن ماشین | W_m | ۱۸۶۶ | kN |
| فرکانس دستگاه | f | ۸۷/۵ | Hz |

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک

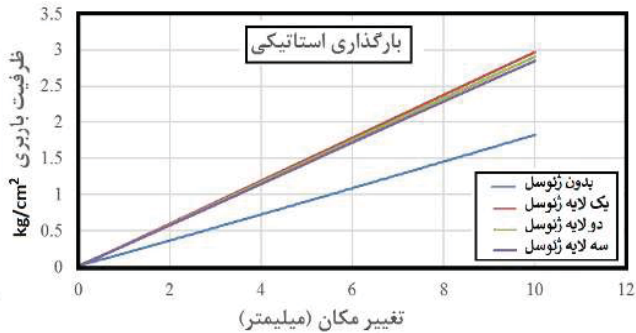
| مشخصه | نماد | مقدار | واحد |
|--------------------|--------|-------|----------|
| دانسیته | ρ | ۲۰ | kN/m^3 |
| ضریب پواسون | ν | ۰/۳۳ | - |
| مدول برشی | G | ۱۱۰ | MPa |
| زاویه اصطکاک داخلی | ϕ | ۳۲ | درجه |

جدول ۳: ابعاد پی و مشخصات بتن فونداسیون

| مشخصه | نماد | مقدار | واحد |
|--------------|--------|------------------------|----------|
| مقاومت فشاری | f_c | ۳۵ | MPa |
| وزن مخصوص | ρ | ۰/۲۵ | kN/m^3 |
| ابعاد | - | $22 \times 8 \times 2$ | m |

مدلسازی در دو جهت افقی طولی و عرضی و در جهت قائم فقط از زیر بسته شده است. مدلسازی متناسب با ابعاد و مشخصات واقعی کار در زمان اجرا، ساخت و نصب ماشین در سایت انجام شده است. مدلسازی لایه ژئوسل نیز در ابعاد و هندسه چشمه مختلف و در اعماق متفاوت در زیر پی انجام شده است و گستردگی از طرفین پی به مقدار ۲ متر بیشتر در نظر گرفته شده است بطوری که هنگامی که دو پی به فاصله ۴ متری از هم قرار دارند، ژئوسل در زیر هر دو پی یکپارچه و در فواصل بیشتر بین دو پی، بصورت مجزا از هم مدل شده‌اند. مشخصات ژئوسل در مدل از رساله دکترای یانگ کیو دانشگاه تگزاس گرفته شده و در جدول ۴ آمده است [۱۸]. هنگامی که فاصله بین دو پی از یکدیگر بیشتر می‌گردد، شرایط سه برابر بودن خاک بایستی رعایت گردد و این امر باعث بزرگ

لایه ژئوسل نشان داده شده است. همانگونه که این نتایج نشان می‌دهند در شرایط بدون ژئوسل، ظرفیت باربری $1/8 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشد که با استقرار یک لایه ژئوسل، ظرفیت با ۶۰ درصد افزایش به $2/9 \text{ kg/cm}^2$ می‌رسد. با افزایش تعداد لایه‌ها به دو لایه و سه لایه، افزایش بیشتری در ظرفیت باربری مشاهده نمی‌شود. در این بررسی تحلیل تاثیر ابعاد سلول ژئوسل با چشمه ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ سانتیمتر و همچنین فاصله استقرار ۱۰ الی ۱۰۰ سانتیمتر مورد بررسی قرار گرفت که پاسخ بهینه آنها حداکثر ظرفیت باربری را $2/9 \text{ kg/cm}^2$ نشان می‌دهند.



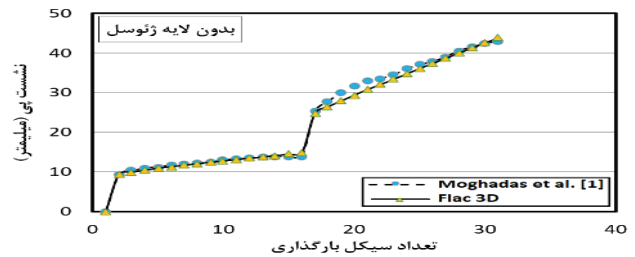
شکل ۶: ظرفیت باربری در شرایط لایه‌های مختلف ژئوسل

۵- ارزیابی تاثیر ژئوسل در کاهش تغییر شکل دو پی مجاور تحت بارگذاری نامتقارن

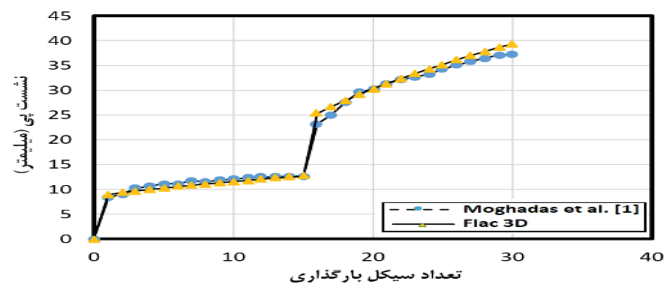
در این تحقیق میزان تغییر شکل خاک ناشی از بارگذاری نامتقارن بین دو پی مجاور مورد بررسی قرار گرفته است تا تاثیر لایه ژئوسل در کاهش تغییر شکل‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا دو پی تحت بارگذاری توربین بصورت غیرهمفاز با اختلاف فاز قرار می‌گیرند تا شرایط بارگذاری نامتقارن ایجاد شود. با تغییر فاصله بین دو پی در شرایط مختلف مشخص شد بیشترین تغییر شکل بین دو پی مجاور هم تحت این بارگذاری غیرهمفاز زمانی رخ می‌دهد که فاصله آنها ۶ متر و عبارتی $0.75B$ باشد بطوریکه در این شرایط، بروز پدیده تشدید احتمال وقوع دارد. در ادامه تاثیر لایه ژئوسل، در کاهش نوسانات و تغییر شکل خاک بین دو پی مجاور در شرایط فوق مورد ارزیابی قرار گرفت. ژئوسل مدل شده در این بخش از تحقیق دارای چشمه ۶۰ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر و همچنین ضخامت ۱/۱ میلیمتر می‌باشد. تاثیر ژئوسل برای اعماق مختلف استقرار لایه شامل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۵ درصد نسبت به عرض پی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج این بررسی نشان داد با استفاده از یک لایه ژئوسل، میزان نوسانات و جابجایی سطح خاک بین دو پی به شدت کاهش یافته و حاشیه اطمینان ماشین افزایش می‌یابد ضمن اینکه بروز پدیده تشدید و جابجایی بین دو پی کاملاً محدود می‌شود. نتایج این تحلیل نشان

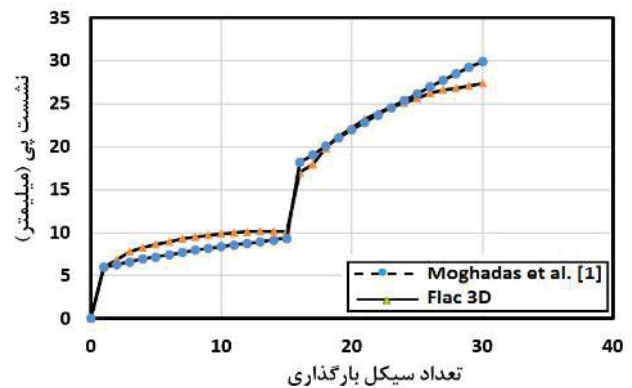
دو لایه ژئوسل ارائه شده است که با خروجی نرم‌افزار فلک مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. این مقایسه در شکل ۳ تا ۵ نشان داده شده است که همانطور که دیده می‌شود پاسخ بدست آمده از نرم‌افزار با نتیجه آزمایش در هر سه حالت تطابق مناسبی با هم دارند.



شکل ۳: مقایسه تغییر مکان پی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری (بدون لایه ژئوسل)



شکل ۴: مقایسه تغییر مکان پی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری (یک لایه ژئوسل)



شکل ۵: مقایسه تغییر مکان پی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری (دو لایه ژئوسل)

۴- ارزیابی تاثیر ژئوسل بر ظرفیت باربری یک پی مجزا

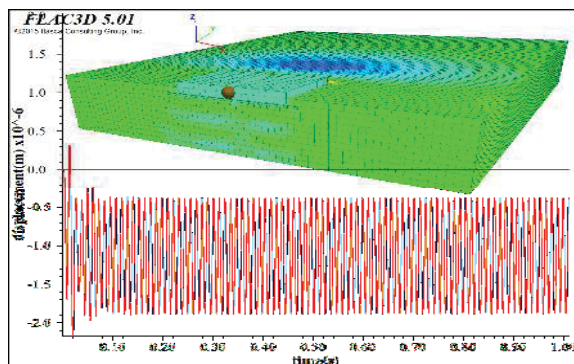
در اولین مرحله از این تحقیق، تاثیر لایه ژئوسل بر ظرفیت باربری پی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا، بارگذاری متقارن متناظر با تغییر مکان ۱۰ میلیمتر مبنای مقایسه قرار می‌گیرد. در شکل ۶ این مقایسه برای شرایط بدون ژئوسل، یک لایه ژئوسل، دو لایه ژئوسل و سه

۶- ارزیابی فاصله ایمن قرارگیری دو پی مجاور هم

در این تحقیق تاثیر ژئوسل بر فاصله ایمن بین پی ماشین آلات تحت بارگذاری نامتقارن نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی، لایه ژئوسل با چشمه ۶۰ سانتیمتر در عمق یک متری قرار داده می شود چرا که در بررسی های قبلی این عمق بعنوان یک عمق مناسب و موثر شناخته می شود. عرض لایه ژئوسل نیز از طرفین پی ۲ متر می باشد. به همین دلیل تا فاصله ۴ متری ژئوسل در زیر دو پی بصورت یکپارچه و در فاصله های بیشتر از ۴ متر بصورت مجزا مدل شده اند. تاثیر لایه ژئوسل بر کاهش نوسانات و دامنه جابجایی نقاط بین دو پی مجاور هم که در فواصل ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۶ و ۲۰ متری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. بعنوان نمونه، مقایسه جابجایی زیر دو پی مجاور هم با فاصله ۲ متر در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. نتایج این بررسی در جدول ۷ نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهند وجود یک لایه ژئوسل بطور محسوس دامنه جابجایی را کاهش می دهد که این مقایسه برای فاصله ۶ متر بسیار محسوس است. نتیجه این تحقیق نشان می دهد با استفاده از یک لایه ژئوسل می توان دو پی را فاصله بسیار نزدیک به هم تا ۲ متر نیز نصب کرد.

جدول ۷: تاثیر یک لایه ژئوسل بر دامنه نوسانات خاک بین دو پی

| فاصله (متر) | حداکثر جابجایی بین دو پی (سانتیمتر) | | دامنه نوسانات (سانتیمتر) | |
|-------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| | بدون ژئوسل | یک لایه ژئوسل | بدون ژئوسل | یک لایه ژئوسل |
| ۲ | -۱/۶۸ | -۱/۴۸ | ۱/۳۱ | ۰/۴ |
| ۴ | ۱ | -۱ | ۱ | ۰/۵۵ |
| ۶ | -۳/۳۷ | -۰/۸۴ | ۵/۵۷ | ۰/۶۸ |
| ۸ | -۰/۴۹ | -۰/۴۳ | ۰/۳۹ | ۰/۳ |
| ۱۰ | ۰/۵۲ | ۰/۳۵ | ۰/۰۸ | ۰/۲ |
| ۱۶ | -۲/۶ | -۰/۵ | ۰/۰۶ | ۰/۰۵ |
| ۲۰ | -۳/۱ | -۰/۶۶ | ۰/۰۱ | ۰/۴۲ |

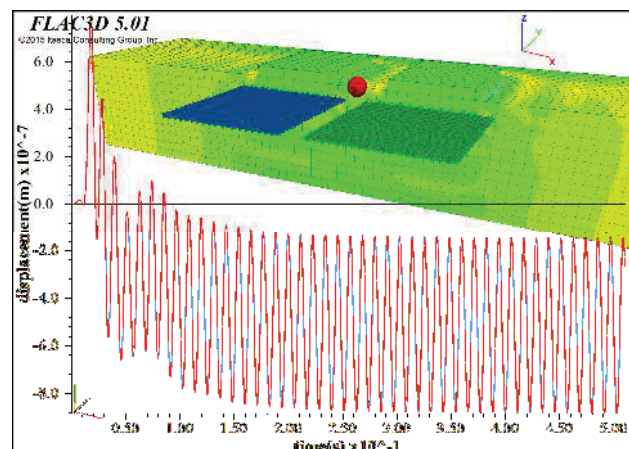


الف

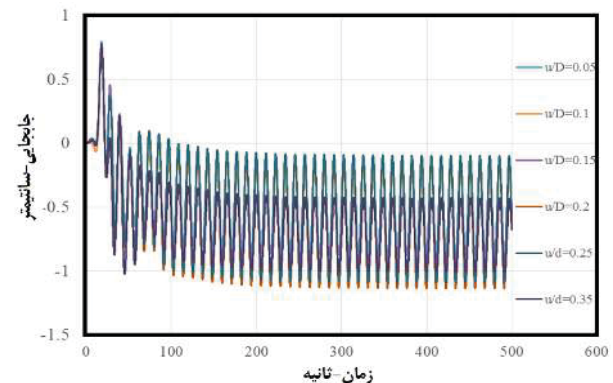
می دهند تاثیر فاصله لایه ژئوسل از زیر پی، تاثیر محسوس بر نتایج ندارد بطوریکه در تمامی حالات مطابق جدول ۶، میزان تفاوت بین آنها در کاهش نوسان و تغییر شکل کمتر از ۲۰ درصد می باشد. شکل ۷ و ۸ نتیجه خروجی یکی از تحلیل ها نرم افزار *FLAC-3D* (فاصله ۶ متری و عمق استقرار ۴۰ سانتیمتر) را نشان می دهد.

جدول ۶: جابجایی و دامنه جابجایی خاک بین دو دستگاه

| نسبت عمق استقرار ژئوسل به عرض پی | ۰/۰۵ | ۰/۱ | ۰/۱۵ | ۰/۲ | ۰/۲۵ | ۰/۳۵ |
|----------------------------------|------|-------|------|------|------|------|
| حداکثر جابجایی (سانتیمتر) | -۰/۸ | -۰/۹۹ | ۰/۹۷ | -۱ | -۱ | -۱ |
| دامنه نوسانات (سانتیمتر) | ۰/۶ | ۰/۷۹ | ۰/۸۲ | ۰/۹۴ | ۰/۹۱ | ۰/۵۱ |



شکل ۷: جابجایی بین دو پی در فاصله ۶ متری مجاور هم با بارگذاری نامتقارن و یک لایه ژئوسل

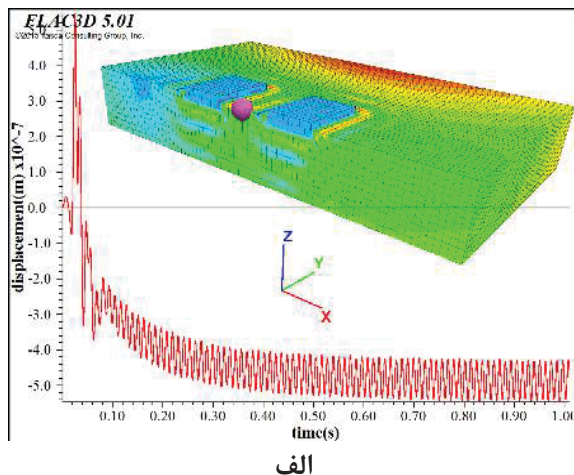


شکل ۸: تغییر مکان بین دو پی مجاور با بارگذاری نامتقارن و یک لایه ژئوسل

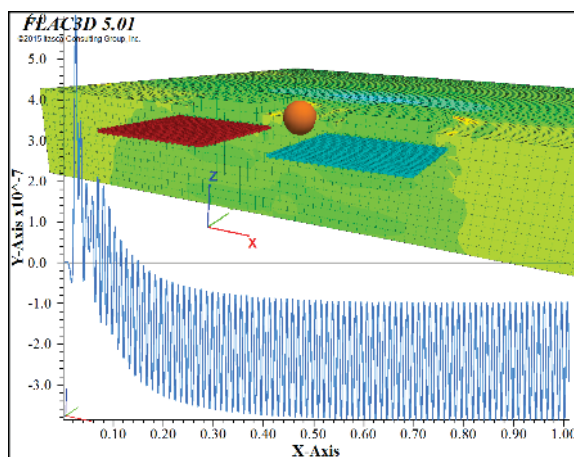
لایه ژئوسل و همچنین چند لایه ژئوسل برای جابجایی بین دو پی را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد با قرار دادن یک لایه ژئوسل، میزان جابجایی در خاک کم شده و حاشیه اطمینان بالا رفته است. جدول ۸ جابجایی بین پی با لایه‌های مختلف ژئوسل را نشان می‌دهد.

جدول ۸: جابجایی و دامنه نوسانات خاک بین دو پی

| تعداد لایه | عمق استقرار (متر) | حداکثر جابجایی (سانتیمتر) | دامنه نوسانات (سانتیمتر) |
|-----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|
| بدون ژئوسل | ۰ | -۰/۵۴ | ۰/۱ |
| یک لایه ژئوسل | ۰/۴ | -۰/۳۸ | ۰/۲۶ |
| دو لایه ژئوسل | ۰/۸ | -۰/۵۹ | ۰/۳۹ |
| سه لایه ژئوسل | ۱/۲ | ۰/۱۶ | ۰/۳ |
| چهار لایه ژئوسل | ۱/۶ | ۰/۴۶ | ۰/۲۶ |
| پنج لایه ژئوسل | ۲ | ۱ | ۰/۳ |



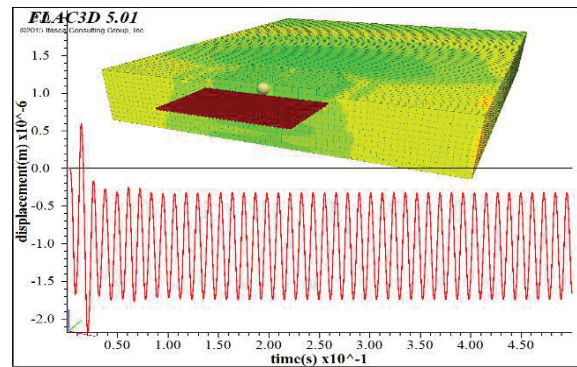
الف



ب

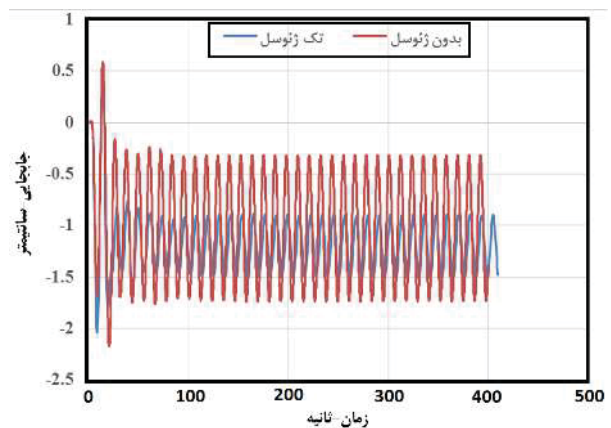
شکل ۱۱: جابجایی بین دو پی مجاور با بارگذاری نامتقارن:

(الف): بدون ژئوسل، (ب): یک لایه ژئوسل



ب

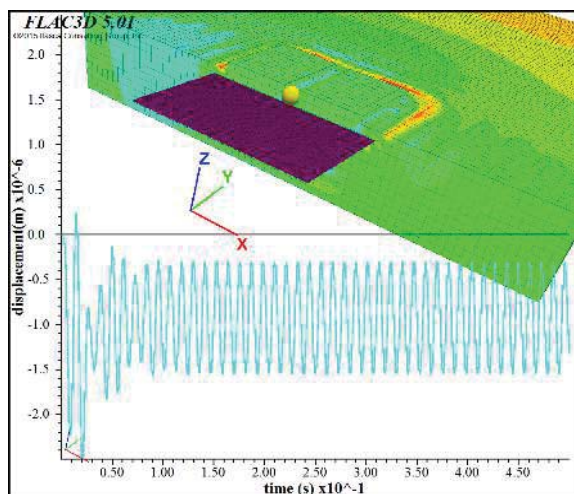
شکل ۹: جابجایی بین دو پی در فاصله ۲ متری مجاور هم با بارگذاری نامتقارن: (الف) بدون ژئوسل (ب) یک لایه ژئوسل



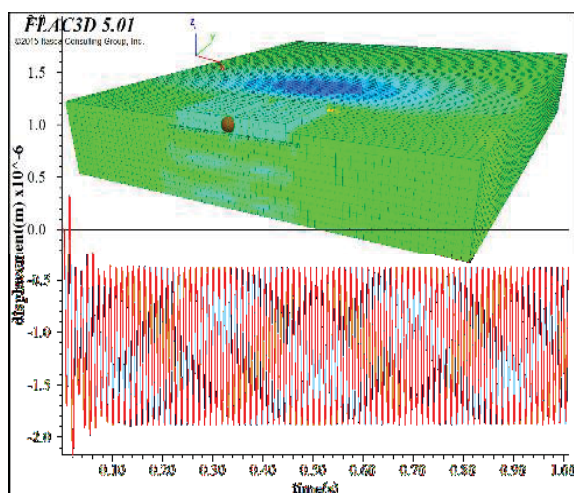
شکل ۱۰: جابجایی در فاصله ۲ متری پی با بارگذاری نامتقارن

۷- تاثیر لایه‌های ژئوسل در جابجایی خاک بین دو پی مجاور هم

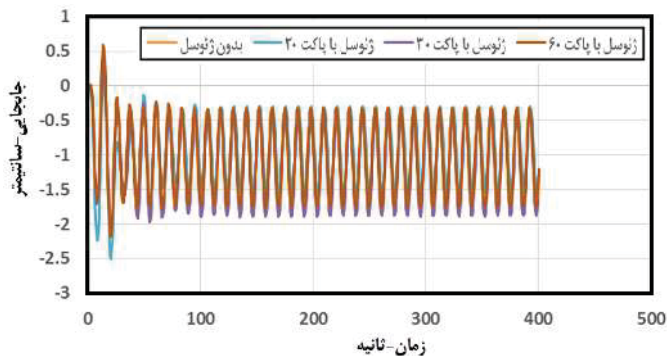
به منظور ارزیابی تاثیر تعداد و فاصله لایه‌های ژئوسل بر کاهش نوسانات بین دوپی، لایه ژئوسل به ترتیب در عمق ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲، ۱/۶ و ۲ متری قرار گرفته است. پس از قرار دادن لایه اول ژئوسل مشاهده شد که به علت بالا رفتن باربری خاک، دامنه تغییر مکان بیشتر ولی نشست کاهش یافت. از آنجا که لایه دوم در فاصله ۱۰ سانتیمتری از لایه اول قرار دارد، اثر کاهش چشمگیری نداشته و باعث افزایش جابجایی می‌گردد. با قرار گرفتن لایه سوم، جابجایی و نشست بین پی تقریباً نزدیک به صفر شده و با افزایش تعداد لایه‌ها به چهار و پنج لایه، جابجایی منفی از بین رفته است و باعث جابجایی به سمت بالا شده است. این نتایج نشان می‌دهند سه لایه ژئوسل حالت مناسب می‌باشد و لایه‌های بیشتر با ایجاد یک دیواره سخت، باعث افزایش جابجایی و نوسانات بین پی شده و جابجایی سطح خاک را افزایش داده است. شکل ۱۱ و ۱۲ خروجی نرم‌افزار FLAC3D در حالت بدون ژئوسل و یک



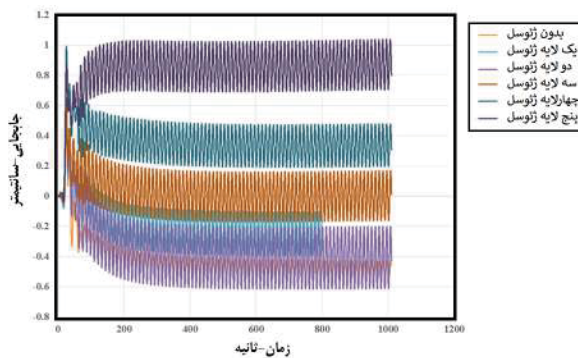
الف



شکل ۹: تغییر مکان بین دو پی مجاور با بارگذاری نامتقارن، (الف): یک لایه ژئوسل با چشمه ۲۰ سانتیمتر، (ب): بدون ژئوسل



شکل ۱۰: جابجایی بین دو پی مجاور با بارگذاری نامتقارن و یک لایه ژئوسل



شکل ۱۲: تغییر مکان بین دو پی مجاور با بارگذاری نامتقارن و چند لایه ژئوسل

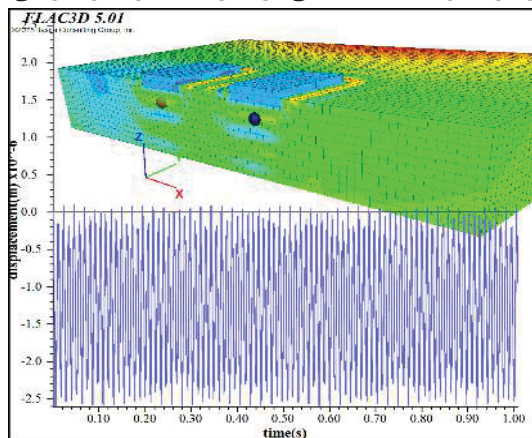
۸- بررسی اثرات چشمه ژئوسل بر جابجایی بین پی

در ادامه این تحقیق اثر چشمه‌های ژئوسل بر جابجایی بین دو پی مورد بررسی قرار گرفته است. فاصله پی ۲ متر و با سه نوع ژئوسل با چشمه ۲۰ و ۳۰ و ۶۰ سانتیمتری که در عمق یک سان ۳۰ سانتیمتر مورد تحلیل قرار گرفته است. به علت افزایش تعداد المان‌ها و تعداد زون در چشمه با پاکت کوچکتر از ۲۰ سانتیمتر، نرم افزار قادر به تحلیل و خروجی نمی‌باشد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد، حالت بدون ژئوسل بیشترین جابجایی را دارد و با قرار دادن ژئوسل در داخل خاک، جابجایی کاهش می‌یابد. در حالتی که یک لایه ژئوسل با چشمه ۲۰ سانتیمتری استفاده می‌شود، دامنه جابجایی کمترین است. چشمه ۳۰ سانتیمتر هم دامنه کمی بیشتر از ۲۰ سانتیمتر دارد. در چشمه ۶۰ سانتیمتر نیز جابجایی در حد مجاز است ولی به مقدار ناچیزی از پاکت با چشمه ۳۰ سانتیمتر جابجایی کمتری دارد. نتیجه اینکه که برای پی‌های حجیم در این تحقیق، استفاده از چشمه‌های ۲۰ سانتیمتر بهینه می‌باشد. جدول ۹ میزان جابجایی و نوسانات را نشان می‌دهد. شکل ۹ و ۱۰ خروجی نرم افزار FLAC3D در حالت بدون ژئوسل و یک لایه ژئوسل با چشمه ۲۰ سانتیمتر را نشان می‌دهند.

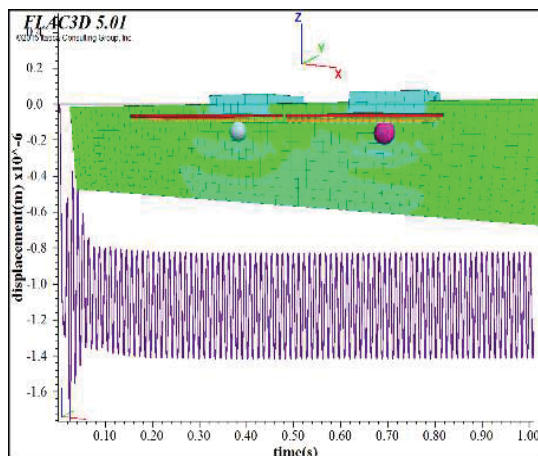
جدول ۹: تاثیر ابعاد چشمه ژئوسل بر دامنه نوسانات خاک بین دو پی

| اندازه چشمه | عمق ژئوسل (متر) | حداکثر جابجایی (سانتیمتر) | دامنه نوسانات (سانتیمتر) |
|----------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|
| بدون ژئوسل | ۰ | -۱/۸۶ | ۱/۴۸ |
| ژئوسل با چشمه ۲۰ سانتی متر | ۰/۳ | -۱/۵۵ | ۱/۲۲ |
| ژئوسل با چشمه ۳۰ سانتی متر | ۰/۳ | -۱/۸۸ | ۱/۴۸ |
| ژئوسل با چشمه ۶۰ سانتی متر | ۰/۳ | ۱/۷۴ | ۱/۴۱ |

کمتری دارند. شکل ۱۴ حداکثر جابجایی در حالت بدون ژئوسل ۲/۶ سانتیمتر، برای یک لایه ژئوسل ۱/۶ سانتیمتر، دو لایه ۱/۴ سانتیمتر و سه لایه ۱/۱ سانتیمتر را نشان می‌دهد. نقاط مشخص شده در شکل نقطه ثبت جابجایی و نوسانات توسط نرم افزار است. در شکل ۱۳-الف که بدون ژئوسل است، جابجایی عمق بی‌شتی دارد ولی با قرار دادن ژئوسل در شکل ۱۳-ب، جابجایی در عمق به مقدار صفر میل می‌کند.



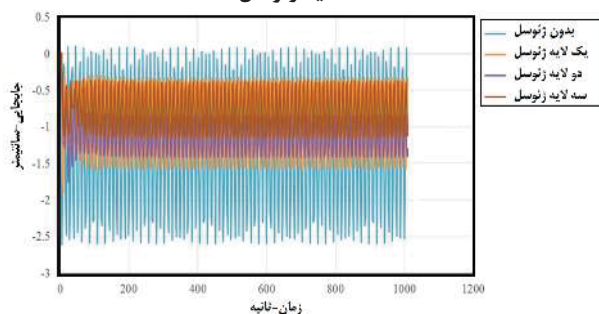
الف



ب

شکل ۱۳: جابجایی در عمق ۲ متری زیر پی، (الف): بدون ژئوسل، (ب)

سه لایه ژئوسل

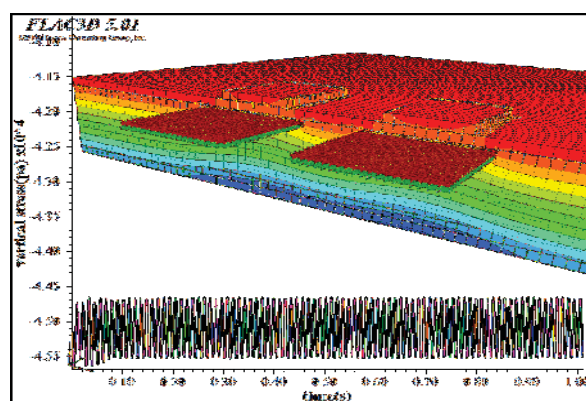


شکل ۱۴: تغییرات جابجایی در عمق ۲ متری زیر پی با چند لایه

ژئوسل

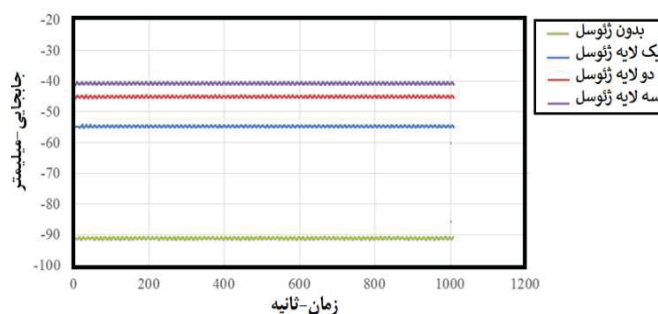
۹- تغییرات تنش در عمق ۲ متری با سه لایه ژئوسل

در ادامه تحقیق تغییرات تنش در عمق ۲ متری با سه لایه ژئوسل مورد بررسی قرار می‌گیرد. با قراردادن لایه‌های مختلف ژئوسل، اختلاف در سنجش تنش ایجاد نمی‌شود. شکل ۱۲ نشان می‌دهد با قرار دادن اولین لایه ژئوسل اختلاف زیادی در کاهش تنش زیر پی ایجاد شده است. این روند در لایه‌های بعدی ژئوسل ادامه پیدا کرده که نشان می‌دهد قرار دادن ژئوسل باعث پخش تنش در سطح بیشتری از خاک می‌شود و تنش زیر پی را کاهش می‌دهد. تنش‌های ایجاد شده در زیر پی از حدود ۹۲ کیلوپاسکال به ۴۱ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد. یک نمونه از خروجی نرم افزار FLAC3D برای تنش زیر پی که خاک آن با دو لایه ژئوسل مسلح در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: تغییرات تنش در عمق ۲ متری زیر پی با دو لایه

ژئوسل



شکل ۱۲: تغییرات تنش در عمق ۲ متری زیر پی

۱۰- تغییرات جابجایی در عمق ۲ متری با سه لایه ژئوسل

در این تحقیق بررسی جابجایی زیر یکی از دو پی مجاور و در فاصله ۱۰ متری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور چهار مرحله تحلیل صورت گرفته و نتایج خروجی برای سه لایه ژئوسل در شکل ۱۳ آمده است. با افزایش تعداد لایه‌ها، جابجایی و نوسانات زیر پی تحت بارگذاری نامتقارن کاهش یافته و خاک اطراف نیز جابجایی

۱۱- نتیجه گیری

منابع و مراجع

1. Binquet, J., & Lee, K. L. (1975). Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *Journal of the geotechnical Engineering Division*, 101(12), 1241-1255.
2. Miyazaki, K., & Hirokawa, F. (1992). Fundamental study of reinforcement of sand layer in model test. In *International symposium on earth reinforcement practice* (pp. 647-652).
3. Huang, C. C., & Menq, F. Y. (1997). Deep-footing and wide-slab effects in reinforced sandy ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1), 30-36.
4. Das, B. M. (2015). *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.
5. Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R., & Rajagopal, K. (2001). Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(4), 235-256.
6. Latha, G. M., & Murthy, V. S. (2007). Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), 23-32.
7. Pokharel, S. K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R. L., & Halahmi, I. (2009). Behavior of geocell-reinforced granular bases under static and repeated loads. In *Contemporary topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support* (pp. 409-416).
8. Tafreshi, S. M., & Dawson, A. R. (2010). Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), 72-84.
9. Moghaddas Tafreshi, S.N., and Dawson, A.R. (2010) "Behavior of footings on reinforced sand subjected to repeated loading—Comparing use of 3D and planar geotextile" *Geotextiles and Geomembranes*, 28(5), 434-447.
10. Tafreshi, S. M., & Dawson, A. R. (2012). A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 32, 55-68.
11. Moghaddas Tafreshi, S.N., and Dawson, A.R. (2014). "Repeated loading of soil containing granulated rubber and multiple Geocell layers" *Geotextiles and Geomembranes*, 42, 25-38.
12. Tafreshi, S. M., Shaghghi, T., Mehrjardi, G. T., Dawson, A. R., & Ghadrnan, M. (2015). A simplified method for predicting the settlement of

در این تحقیق مطالعه موردی مسلح سازی خاک زیر فونداسیون توربین گازی شرکت مینا با استفاده از ژئوسل مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه به روش عددی با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D در شرایط مختلف هندسی انجام شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل فاصله ایمن استقرار دو پی به صورت غیر هم فاز، عمق استقرار ژئوسل، تعداد لایه ها، اثر ابعاد چ شمه و ارزیابی ظرفیت باربری پی می باشد که نتایج حاصل بصورت زیر قابل بیان است.

- ظرفیت باربری خاک آنچنان که انتظار می رفت با مسلح سازی افزایش می یابد و مقدار افزایش به تعداد لایه، فاصله لایه ها و ابعاد چ شمه متناسب است.
- کاهش جابجایی بین دو پی حاصل از کار ماشین و به صورت غیرهمفاز، با تغییر عمق استقرار لایه ژئوسل قابل توجه نیست و یک لایه در عمقی کمتر از 2B تاثیر مناسبی خواهد داشت.
- با کنترل معیار جابجایی ناشی از کار ماشین، فاصله ایمن بین دو پی جهت استقرار دو د ستگاه غیر همفاز بیش از ۲۰ متر است اما با استفاده از یک لایه ژئوسل، میزان جابجایی به شدت کاهش یافته و فاصله کمتر از ۶ متر خواهد شد. افزایش یافته است.
- در کنترل جابجایی ناشی از کار ماشین، مقدار و شدت توزیع جابجایی بین دو پی با قرار دادن لایه های مختلف ژئوسل کاهش می یابد و تا سه لایه بهترین تاثیر را دارد. مشاهده شد با افزایش تعداد لایه ها، بالادگی و جابجایی معکوس ناشی از تشکیل لایه سخت و با دانسیته بالا احتمال بروز دارد.
- با تغییر ابعاد و هندسه چ شمه های ژئوسل، جابجایی بین دو پی بصورت قابل توجهی کاهش می یابد. هندسه چ شمه ۲۰ سانتی متر با ارتفاع ۲۰ سانتی متر و ضخامت چند میلیمتر کاهش مناسبی را در نتایج تا بیش از ۱۷ درصد نشان می دهد.
- با کنترل معیار تنش زیر پی، با استقرار سه لایه ژئوسل، تنش قائم بطور قابل توجهی تا میزان ۵۰ درصد کاهش یافته و محدوده بیشتری از خاک در مقایسه با حالت غیرمسلح تحت تاثیر بار پی قرار می گیرند.
- به منظور کنترل جابجایی بین دو پی، عمق موثر لایه های ژئوسل در محدوده 0.5B تا 2B پیشنهاد می شود.
- نتایج حاصل از تحلیل در این تحقیق نشان می دهد با استقرار سه لایه ژئوسل در زیر فوندا سیون این نوع ماشین آلات، فاصله ایمن پی را که بر اساس محاسبات تحلیلی شرکت مینا (بدون مسلح کننده) حدود ۱۰ متر است را می توان تا حدود ۲ متر نیز کاهش داد که می تواند در محدودیت های ابعادی مورد نظر مهندسان قرار گیرد.

- circular footings on multi-layered geocell-reinforced non-cohesive soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 332-344.
13. Tafreshi, S. M., Sharifi, P., & Dawson, A. R. (2016). Performance of circular footings on sand by use of multiple-geocell or-planar geotextile reinforcing layers. *Soils and Foundations*, 56(6), 984-997.
14. Isik, A., & Gurbuz, A. (2020). Pullout behavior of geocell reinforcement in cohesionless soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(1), 71-81.
15. Choudhary, A. K., & Dash, S. K. (2021). Influence of soil density on performance of geocell-reinforced vertical anchor in sand. *Geosynthetics International*, 1-12.
16. Khorsandiardebili, N., & Ghazavi, M. (2021). Static stability analysis of geocell-reinforced slopes. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(3), 852-863.
۱۷. مشخصات توربین های گازی ایران، شرکت توگا (گروه صنعتی مپنا
نیر پارس تولید کننده توربین های گازی مولد برق)
18. Xiaoming Yang, (2010). "Numerical Analyses of Geocell-Reinforced Granular Soil under Static and Repeated Loads", PhD Thesis, Kansas University.