



# The Effect of Geo-grid Plates on Vertical Displacement and Shearing Force on Foundation Using Finite Element Method and Two-dimensional PLAXIS Software

Hamed Yousefi<sup>1\*</sup>, Seyed Morteza Marandi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

<sup>2</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 03.03.2021

**Revised:** 07.06.2021

**Accepted:** 09.01.2021

### Keyword:

Loose Clays

Geo-grid

Two-dimensional Analysis

Soil Improvement

## ABSTRACT

Geo-synthetics are made from polymers used to stabilize and improve soil behaviors. Nowadays, geo-grids are widely used in geotechnical engineering applications. In the present study, a surface foundation located on three different soil layers under a uniform load was modeled and analyzed using finite element method under specified acceleration. The intermediate soil profile consisted of loose clay reinforced using two types of geo-grids with different distances. The results showed that by increasing vertical distance between the geo-grid layers, the vertical displacement, axial force, shear force and flexural anchor applied to the foundation also increased. Furthermore, in the case of geo-grid layer positioned at a depth of 5m or more, the shear force and flexural moment increased with a steeper slope in comparison with other cases.

### \*Corresponding Author:

Hamed Yousefi

**Email:**

[hamed.yousefi@eng.uk.ac.ir](mailto:hamed.yousefi@eng.uk.ac.ir)



---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### Introduction

Clay soils must be modified or improved in civil projects. Many methods exist to improve this type of soil, one of which is the use of geogrid layers. In the past, soil improvement was mostly done with coarse grain materials as filler. However, in recent decades, all kinds of geosynthetics, including geotextiles, geocells, and geogrids, have been used to strengthen the soil in many construction projects, and the strengthening of the soil by geosynthetics helps to increase the stability against the overall damage of the embankment and foundation soil. In many countries of the world and in most construction projects, the provision of suitable materials for improving the environment is a major problem, because either suitable materials are not available, or if they are available, they must be transported a long distance to the work site which is costly. Soil modification with geogrid is a very suitable option for most modification projects due to its economic advantages, such as eliminating the costs of moving and replacing the surrounding soil and the low cost of its implementation, as well as its high reliability, simple implementation method, and the ability to adapt to different environmental conditions. It contributes to soil improvement.

### Methodology

In the present study, a surface foundation located on three different soil layers under a uniform load was modelled and analysed using finite element method under specified acceleration. The intermediate soil profile consisted of loose clay reinforced using two types of geogrids with different distances. Tables 1, 2, and 3 show the materials used in modelling and Table 4 shows the modelling program.

**Table 1. Soils parameters.**

Soil Name	Loosly Clay	Hardening Clay	Hardening Sand	Units
Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	---
Type	Drained	Drained	Drained	---
$\gamma_{sat}$	12	17	17	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	17	19	21	kN/m <sup>3</sup>
Eref	3000	12000	120000	kN/m <sup>2</sup>
$\nu$	0.2	0.4	0.3	---
$c$	10	70	1	kN/m <sup>2</sup>
$\phi$	10	25	33	°
Rinter	0.5	0.5	0.7	---

**Table 2. Geogrids parameters.**

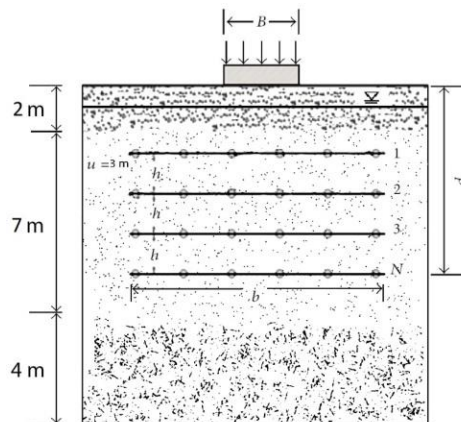
Geogrid Name	Mesh Size (mm)	Materials	Type	Nominal Tensile Strength(kN/m)	Mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )
GG1	20×20	Polyester	Woven	35	220
GG2	40×40	Polyester	Woven	55	300

**Table 3. Geocomposites parameters.**

Geocomposite Name	Mesh Size (mm)	Materials	Opening Size of the Nonwoven	Nominal Tensile Strength(kN/m)	Mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )
Basetrac Duo PET 30 B15	25×25	PET vs PP	120	30	300
Basetrac Duo-C PET 30 B15	25×25	PET vs PP	100	30	350
Basetrac Duo-C PP 30 B15	25×25	PP	100	30	420

Much research has been carried out on the appropriate length of the geogrid layer ( $b$ ), the distance of the first geogrid layer from the foundation ( $u$ ), the vertical distance of the geogrid layers from each other ( $h$ ) and the final depth reinforced with the geogrid layers ( $d$ ) for soil reinforcement of sand and clay. In Figure (1), all the aforementioned variables in this paragraph are shown. The value of  $d$  can be obtained from equation (1).

$$d = u + (N - 1)h \quad (1)$$

**Figure 1. View of modelling in this research.**

## Results and discussion

In this section, to verify the results obtained, some of the results are compared with the findings of Kumar Jain and his colleagues. Kumar Jain and his colleagues (2020) used geogrid plates of 31x31 mm sized springs and stone columns to reinforce the soft soil under the foundation of a building in an area called Kathmandu. For numerical modelling, 12.5-meter-long foundation bearing a uniform load of 150 kPa was considered. These researchers reached the conclusion that the use of geogrid plates in addition to stone columns was a very suitable solution to reduce settlements and increase the bearing capacity. Then, the vertical displacement diagram

was calculated and drawn along the length of the foundation. In the present study, the length of the foundation was 6 meters and under a uniform load of 90 kilopascals, which was reinforced by the geogrid layers of the soil below it. In the graph below (Figure 2), the vertical displacement value obtained from the present study was compared with the vertical displacement value of Kumar Jain and colleagues' study. According to the presented graph, the results obtained in both studies were close to each other and acceptable.

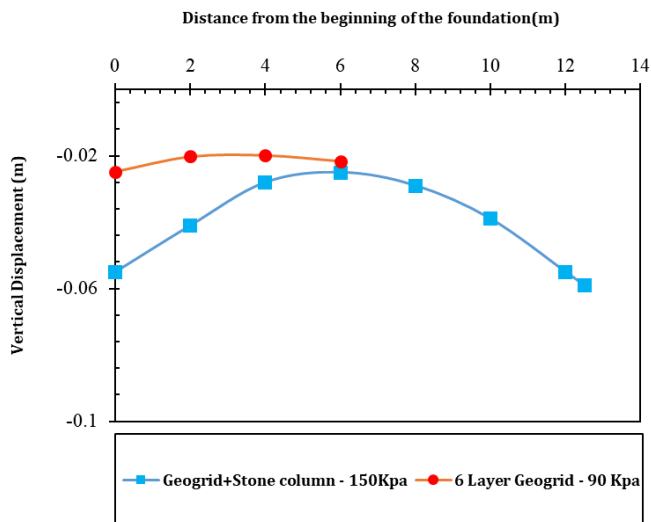


Figure 2.

## Conclusion

The main purpose of this study was to investigate the behaviour of surface foundations based on 3 different soil layers. The middle layer consisted of loose clay soil and was reinforced by several layers of geogrid. For this reason, 25 software models were designed and analysed; the models were designed without geogrid layers and with geogrid layers. The findings of these analyses are stated below:

- 1- It was observed that as the distance between geogrid layers increased, the amount of vertical movement of the foundation gradually increased and vice versa.
- 2- In general, as the distance between geogrid layers increased, the amount of axial force on the footing increased with a greater slope.
- 3- By increasing the distance between the geogrid layers, the amount of shear force on the footing became linear from the geogrid layer with a depth of 5 meters and increased with a large slope compared to the other investigated modes.
- 4- By increasing the distance between the layers of the geogrid, the curve indicating the bending anchor on the footing gradually turned into a straight line with a high slope, compared to the other studied modes, and continued its upward trend.
- 5- It was also observed that the use of geogrid layer GG1 or GG2 did not have much effect on the analysis results.

## تأثیر لایه‌های ژئوگرید بر جابه‌جایی قائم و نیروی برشی وارد بر پی با تأکید بر روش اجزای محدود و نرم‌افزار PLAXIS 2D

حامد یوسفی<sup>۱\*</sup>، سید مرتضی مرندی<sup>۲</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.
- ۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

ژئوسنتتیک، نام کلی مجموعه مصالحی است که از مواد مصنوعی نظیر پلیمرها ساخته شده و برای پایداری و بهسازی رفتار خاک استفاده می‌شوند. ژئوگریدها زیرمجموعه‌ای از ژئوسنتتیک‌ها می‌باشند که امروزه کاربرد فراوانی در مهندسی ژئوتکنیک پیدا کرده‌اند. در پژوهش حاضر، یک پی سطحی که بار یکنواختی را تحمل می‌کند و روی سه لایه خاکی متفاوت قرار دارد، با استفاده از روش اجزای محدود و تحت یک شتاب نگاشت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل شده است. لایه میانی خاک، متشکل از خاک رس سست می‌باشد که توسط دو نوع ژئوگرید با تعداد و فواصل متفاوت تسلیح شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله قائم بین لایه‌های ژئوگرید، جابه‌جایی قائم، نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی وارد بر پی افزایش می‌یابد. نیروی برشی و لنگر خمشی وارد بر پی، برای لایه ژئوگرید با عمق قرارگیری ۵ متر به بعد با شیب زیادی نسبت به دیگر حالت‌های مطالعه شده افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تفاوت لایه‌های ژئوگرید مورد استفاده در این پژوهش، تأثیر چندانی در نتایج تحلیل‌ها نداشت.

### نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

### کلید واژگان:

رس سست

ژئوگرید

تحلیل دو بعدی

بهسازی خاک

\*نویسنده مسئول: حامد یوسفی

پست الکترونیکی:

[hamed.yousefi@eng.uk.ac.ir](mailto:hamed.yousefi@eng.uk.ac.ir)

## مقدمه

اغلب خاک‌های موجود در طبیعت به صورت غیرهمگن هستند. خاک‌های رسی جزو خاک‌های مسئله‌دار محسوب می‌شوند و بسترهای رسی نرم به دلیل ظرفیت باربری کم و شکل‌پذیری زیاد، در اغلب پروژه‌های عمرانی مورد اصلاح یا بهسازی قرار می‌گیرند [۱]. بهسازی خاک، به معنی اصلاح ویژگی خاک برای بهبود عملکرد فنی آن و تقویت خاک زیر پی‌های سطحی برای بهبود ظرفیت تحمل و نشست پی‌ها می‌باشد [۲؛ ۳]. در گذشته، بهسازی خاک بیشتر با مواد دانه‌درشت، به‌عنوان ماده پرکننده انجام می‌شد. اما در چند دهه اخیر انواع ژئوسنتتیک‌ها از جمله ژئوتنکستایل، ژئوسل و ژئوگریدها برای تقویت خاک در بسیاری از پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شوند که تقویت خاک توسط ژئوسنتتیک‌ها، به افزایش پایداری در برابر خرابی کلی خاکریز و خاک پی کمک می‌کند [۴؛ ۵]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به‌صورت آزمایشگاهی و صحرایی انجام شده است که در رابطه با تأثیر مثبت استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در تقویت روسازی جاده‌ها، پی‌های سطحی و تثبیت شیب‌ها است [۶]. در بسیاری از کشورهای جهان و در بیشتر پروژه‌های عمرانی تهیه مصالح مناسب برای اصلاح خاک محیط، مشکل بزرگی می‌باشد؛ زیرا یا مصالح مناسب در دسترس نمی‌باشند یا اگر هم در دسترس باشند باید به مسافت طولانی تا پای کار حمل شوند که این کار هزینه قابل‌توجهی دارد [۷]. اصلاح خاک با ژئوگرید به دلیل مزایای اقتصادی از جمله حذف هزینه‌های جابه‌جایی و تعویض خاک محیط و کم‌هزینه بودن اجرای آن و همچنین قابلیت اطمینان بالا، روش اجرای ساده و توانایی سازگاری با شرایط مختلف محیط یک گزینه بسیار مناسب برای بیشتر پروژه‌های اصلاح یا بهسازی خاک می‌باشد [۸]. در خاک‌های تسلیح شده با ژئوگرید، مقاومت کششی ایجاد شده در بین ژئوگرید و خاک مانع از جابه‌جایی بیش‌ازحد خاک می‌شود [۹].

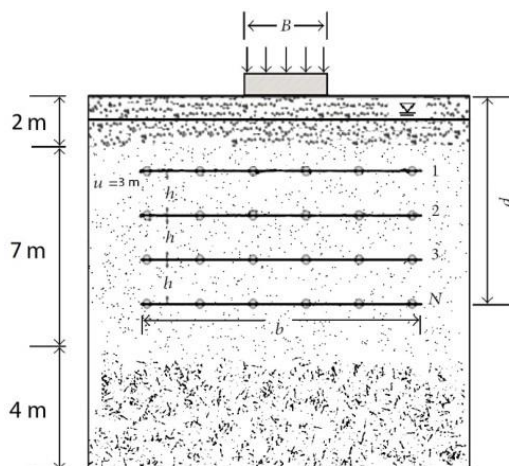
جولیان و مینگ جیانگ (۲۰۰۷) با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس به بررسی عملکرد خاک‌های تسلیح شده که شامل چهار نوع خاک، سه نوع ژئوگرید و یک نوع ژئوتنکستایل بود، پرداختند. نتایج ارائه شده حاکی از آن است که میزان بهبود خواص مکانیکی خاک به میزان فشار نرمال، نوع خاک و نوع ژئوسنتتیک وابسته می‌باشد [۱۰]. سیاوش‌نیا و همکاران (۲۰۱۰) تحقیقی در رابطه با تأثیر تعداد، طول و مدول لایه‌های ژئوتنکستایل انجام دادند و نتیجه گرفتند که استفاده از ژئوتنکستایل بین بستر و پایه یا افزایش مدول ژئوتنکستایل می‌تواند جابه‌جایی‌ها را کاهش دهد [۱۱].

حسینی و همکاران (۲۰۲۰) به مطالعه رفتار پی‌های نواری ساخته شده روی یک لایه تقویت شده از خاک رس با ژئوگرید پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده، نشست پی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۲].

نتایج تحقیقات Abd El Raouf و همکاران (۲۰۲۰) که در مورد پایداری خاکریز تقویت شده با ژئوگرید روی خاک رس نرم بود و به بررسی تأثیر فاصله لایه‌های ژئوگرید، عمق اولین لایه ژئوگرید و زاویه اصطکاک داخلی می‌پرداخت نشان داد که فاصله مطلوب بین لایه‌های ژئوگرید ۰/۵ متر است و همچنین، نصب اولین لایه ژئوگرید بین لایه خاکریز و لایه خاک رس نرم بدون فاصله عمودی توصیه شده است [۱۳].

تحقیقات زیادی در مورد طول مناسب لایه ژئوگرید (b)، فاصله اولین لایه ژئوگرید از زیر پی (u)، فاصله قائم لایه‌های ژئوگرید از هم (h) و عمق نهایی مسلح شده با لایه‌های ژئوگرید (d)، برای مسلح کردن خاک‌های ماسه‌ای و رسی انجام شده است. در شکل (۱) تمامی متغیرهای بیان شده در این بند نشان داده شده‌اند. مقدار d را می‌توان از رابطه (۱) به‌دست آورد.

$$d = u + (N - 1)h \quad (1)$$



شکل ۱. نمای شماتیک مدل‌سازی در این پژوهش.

براساس مطالعات Ghosh و همکاران (۲۰۰۵)، طول بهینه مناسب برای لایه ژئوگرید برابر با  $b = 5B$  تا  $b = 7B$  (اندازه عرض پی) می‌باشد و براساس مطالعات Sawwaf and Nazir (۲۰۱۰) مقدار طول بهینه لایه ژئوگرید برابر با  $b = 5B$  می‌باشد [۱۴؛ ۱۵]. همچنین نتیجه مطالعات Radhey و همکاران (۲۰۰۹) در مورد پی‌های مستقر بر خاک مسلح شده با ژئوگرید حاکی از آن است که بهتر است فاصله اولین لایه ژئوگرید از زیر پی در بازه  $0.2B$  تا  $0.5B$  و طول آن نیز در بازه  $2B$  تا  $8B$  قرار گیرد [۱۶]. همان‌طور که مشاهده می‌شود تحقیقات زیادی در رابطه با بهسازی خاک‌ها با ژئوگریدها انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی تعداد و فاصله لایه‌های ژئوگرید از هم برای بهسازی یک توده خاک که از سه لایه متفاوت تشکیل شده است و روی لایه سطحی آن یک صفحه بتنی (پی) که یک بار یکنواخت را تحمل می‌کند، پرداخته می‌شود (شکل ۱).

### مواد و مصالح

به پارامترهای همه لایه‌های خاکی مدل‌سازی شده در جدول ۱ اشاره شده است و پی سطحی که بار یکنواخت  $90 \text{ kN/m}$  را تحمل می‌کند نیز به صورت یک صفحه بتنی که در آن از مدل Elastic با  $EI = 1.667e7$  و  $EA = 2e7$  و ضخامت ۱ متر استفاده شده است، می‌باشد. در این پژوهش، لایه میانی که متشکل از رس سست می‌باشد توسط دو نوع ژئوگرید با تعداد و فواصل قائم مختلف از هم مسلح خواهد شد که به مشخصات ژئوگریدها در جدول ۲ اشاره شده است. با توجه به شکل (۱)، ضخامت لایه‌های خاک از سطح زمین به پایین به ترتیب برابر با ۷، ۲ و ۴ متر است و سطح آب زیرزمینی در ۱ متری سطح زمین قرار دارد. مدل‌های طراحی شده در نرم‌افزار دارای عرض ۶۰ و عمق ۱۳ متری می‌باشند.

جدول ۱. مشخصات خاک [۱۷؛ ۱۸].

واحد	ماسه سفت	رس سفت	رس سست	Soil Name
	موهر-کولمب	موهر-کولمب	موهر-کولمب	Model
	Drained	Drained	Drained	Type
$\gamma_{\text{unsat}}$	۱۷	۱۷	۱۲	
$\text{kN/m}^3$				

Soil Name	رس سست	رس سفت	ماسه سفت	واحد
$\gamma_{sat}$	۱۷	۱۹	۲۱	kN/m <sup>3</sup>
$E_{ref}$	۳۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۲۰۰۰۰	kN/m <sup>2</sup>
$\nu$	۰/۲	۰/۴	۰/۳	-
$c$	۱۰	۷۰	۱	kN/m <sup>2</sup>
$\phi$	۱۰	۲۵	۳۳	°
$R_{inter}$	۰/۵	۰/۵	۰/۷	-

بهمنظور مدل سازی رفتار تنش- کرنش خاک، از معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده شده است. پارامترهای اصلی این مدل  $c$  (چسبندگی) و  $\phi$  (زاویه اصطکاک داخلی) می باشند، پارامترهای دیگری مثل وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون نیز در این مدل رفتاری مورد نیاز می باشند.

جدول ۲. مشخصات ژئوگریدها [۱۹].

Mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )	مقاومت کششی (kN/m)	Type	جنس	اندازه چشمه (mm)	ژئوگرید
۲۲۰	۳۵	Woven	Polyester	۲۰x۲۰	GG۱
۳۰۰	۵۵	Woven	Polyester	۴۰x۴۰	GG۲

ژئوکامپوزیت ها یکی از انواع ژئوسنتتیک ها می باشند که برای افزایش استحکام و پایداری خاک های مسئله دار مورد استفاده قرار می گیرند. لایه ژئوکامپوزیت، معمولاً شامل ژئوگرید دو محوره ای است که روی لایه ای از ژئوتکستایل پلی پروپیلن نفاخته قرار گرفته است. هوسکر یک شرکت آلمانی می باشد که در زمینه طراحی و تولید انواع مختلف صفحات ژئوسنتتیک فعالیت می کند و چندین نوع ژئوکامپوزیت با جنس های پلی پروپیلین (PP) و پلی اتیلن (Pet)، توسط این شرکت طراحی و تولید شده است که می توان از آن ها نیز برای بهسازی خاک های رسی استفاده کرد. در جدول (۳) به مشخصات چند مورد از این صفحات ژئوکامپوزیت اشاره شده است.

جدول ۳. مشخصات ژئوکامپوزیت ها [۲۰-۲۲].

Mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )	مقاومت کششی (kN/m)	جنس	Organization Size of the Nonwoven ( $\mu$ m)	اندازه چشمه (mm)	ژئوکامپوزیت
۳۰۰	۳۰	PET vs PP	۱۲۰	۲۵x۲۵	Basetrac Duo PET ۳۰ B۱۵
۳۵۰	۳۰	PET vs PP	۱۰۰	۲۵x۲۵	Basetrac Duo-C PET ۳۰ B۱۵
۴۲۰	۳۰	PP			Basetrac Duo-C PP ۳۰ B۱۵

### شرایط مرزی

در مورد شرایط مرزی مدل طراحی شده در نرم‌افزار، به تمام مرزهای مدل در هر جهت باید یک شرایط مرزی تعریف شود، در غیر این صورت مرزها آزادانه جابه‌جا خواهند شد و توده خاک، پایداری خود را از دست خواهد داد. برای جلوگیری از این اتفاق، شرایط مرزی کاملاً ثابت را برای نقاط مرجع و شرایط مرزهای غلتکی را در جهت‌های قائم اعمال می‌کنیم. یعنی خاک در مرزهای چپ و راست، قابلیت حرکت در جهت قائم را خواهد داشت ولی در مقابل تغییر مکان‌های جانبی محدود می‌شود و در پایین هندسه مدل، مرزهای افقی و قائم ثابت می‌باشند یعنی اجازه هیچ نوع حرکتی به مرز پایین داده نمی‌شود و چون مدل‌های طراحی شده تحت شتاب نگاشت کوبه که در سال ۱۹۹۵ در کشور ژاپن اتفاق افتاد و ایستگاه Nishi-Akashi بزرگای آن را ۶/۹ ثبت کرد، تحلیل خواهند شد؛ بنابراین در مرزهای قائم برای جذب امواج خروجی، شرایط مرزهای جاذب اعمال خواهد شد. برای ایجاد یک مش‌بندی اجزای محدود صحیح نیز ابتدا یک مش با اندازه متوسط برای کل مدل ایجاد می‌شود و سپس چون تمرکز تنش‌ها در ناحیه اطراف لایه‌های ژئوگرید و زیرصفحه بتنی خواهد بود؛ این ناحیه از مش‌بندی اصلاح می‌شود یعنی مش‌های این ناحیه‌ها در دو مرحله ریزتر می‌شوند تا نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌ها دقت بیشتری داشته باشند.

### مدل‌سازی عددی

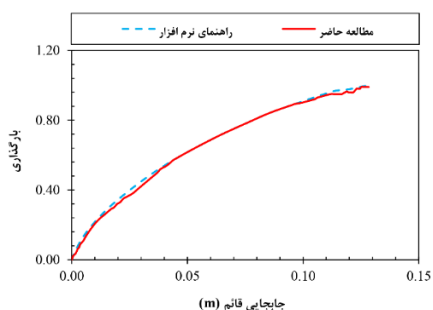
به‌منظور مدل‌سازی از نرم‌افزار PLAXIS ۲D که یک نرم‌افزار اجزای محدود می‌باشد و برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد استفاده شده است. در این نرم‌افزار قابلیت به‌کارگیری المان‌های ۶ و ۱۵ گره‌ای موجود می‌باشد ولی در این پژوهش به‌منظور افزایش دقت نتایج، عناصر ۱۵ گره‌ای و با توجه به هندسه مدل، شرایط کرنش مسطح برای طراحی انتخاب شده است. در جدول (۴)، به مشخصات مربوط به طول پی، فاصله اولین لایه ژئوگرید از زیر پی، طول لایه‌های ژئوگرید، فاصله قائم لایه‌های ژئوگرید از هم و تعداد لایه‌های ژئوگرید در هر مدل‌سازی اشاره شده است.

جدول ۴. برنامه مدل‌سازی.

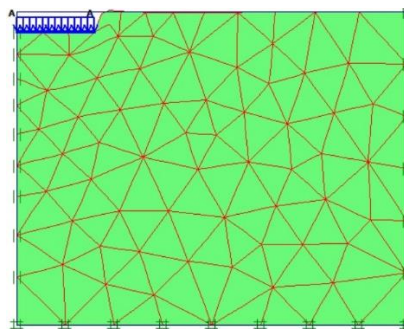
توضیحات	تعداد لایه‌های ژئوگرید	H (m)	b (m)	U (m)	B (m)	ردیف
بدون لایه ژئوگرید	-	-	-	-	-	۱
	U	-				۲
	U+۱ = ۲					
	U+۲ = ۳					
	U+۳ = ۴	۱				۳
	U+۴ = ۵					
	U+۵ = ۶					
با ژئوگرید	U+۱ = ۲		۶B = ۳۶	۰/۵B = ۳	۶	
	U+۲ = ۳					
	U+۳ = ۴	۱/۵				۴
	U+۴ = ۵					
	U+۱ = ۲					
	U+۲ = ۳	۲				۵

### صحت‌سنجی نرم‌افزار

برای صحت‌سنجی نرم‌افزار پلکسیس از راهنمای خود نرم‌افزار PLAXIS ۲D v۸.۰۶ که در سال ۲۰۰۶ منتشر شده و صحت آن تأیید شده است، استفاده می‌شود. یک پی بتنی دایره‌ای به شعاع ۱ متر که بار یکنواخت قائم  $35 \cdot \text{kN/m}^2$  را تحمل می‌کند، روی یک لایه ماسه به ضخامت ۴ متر قرار دارد؛ بنابراین مدلی که در راهنمای نرم‌افزار به آن اشاره شده است مجدداً در نرم‌افزار پلکسیس مدل‌سازی می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده از آن با نتایج ارائه شده در راهنمای نرم‌افزار مقایسه می‌شود که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و مقایسه آن‌ها با نتایج ارائه شده در راهنمای نرم‌افزار مشاهده شد که هر دو نتیجه تطابق زیادی با یکدیگر دارند که در شکل‌های ۲ و ۳ نیز به‌خوبی قابل مشاهده می‌باشند.



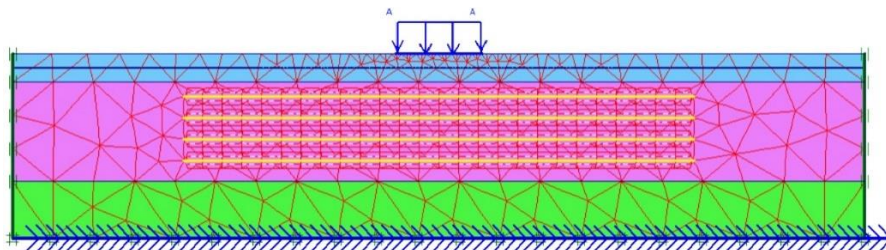
شکل ۳. نمودار بار-جابجایی.



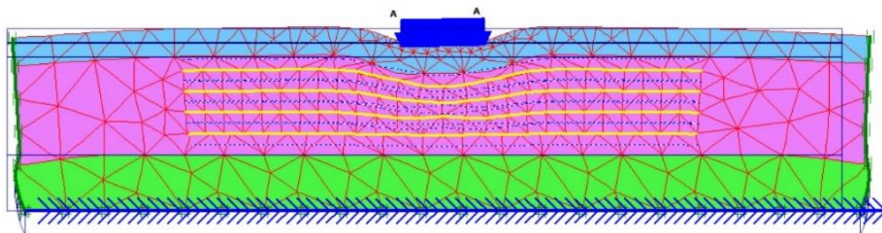
شکل ۲. نمایی از مش تغییرشکل‌یافته مدل صحت‌سنجی شده.

### تحلیل مدل

با توجه به مطالبی که در بخش‌های قبلی به آن‌ها اشاره شد مدل اولیه در نرم‌افزار PLAXIS ۲D طراحی گردید و سپس شرایط مرزی، مشخصات مصالح، مش بندی و سطح آب زیرزمینی به مدل اختصاص داده شد و در نهایت توسط شتاب نگاشت موردنظر تحلیل گردید که در شکل (۴) به نمایی از یکی از مدل‌سازی‌ها اشاره شده است و شکل (۵) نیز بیان‌کننده حالت بعد از اتمام تحلیل می‌باشد که مش بندی تغییرشکل‌یافته و جابه‌جایی‌ها را با مقیاس ۵ برابر بزرگ‌تر نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمایی از مدل‌سازی انجام شده.



شکل ۵. نمایی از مش‌بندی تغییرشکل‌یافته در نتیجه تحلیل مدل.

## بحث و تحلیل نتایج

### نتایج تحلیل مدل بدون لایه ژئوگرید

در جدول (۵) به نتایج حاصل از تحلیل مدل‌سازی‌ای که در آن از لایه ژئوگرید استفاده نشده، اشاره شده است. این جدول، مقدار جابه‌جایی قائم و نیروهای وارد بر پی را در این تحلیل نشان می‌دهد.

### جدول ۵. نتایج حاصل از تحلیل مدل بدون لایه ژئوگرید.

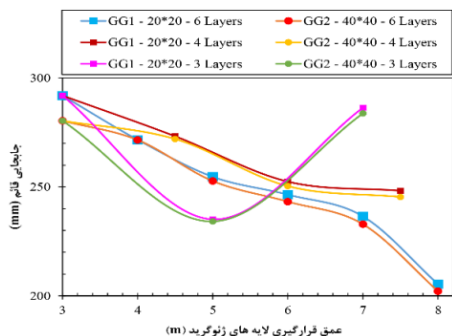
جابه‌جایی قائم (mm)	نیروی محوری (kN/m)	نیروی برشی (kN/m)	لنگر خمشی (kN/m)
۴۰۷/۹۶	۴۰/۰۳	۱۲۲/۶۲	۲۰۰/۵۲

### نتایج تحلیل مدل‌ها با لایه‌های ژئوگرید

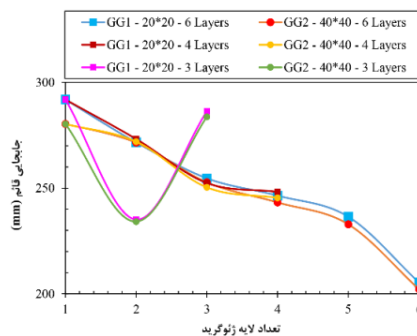
در این بخش از پژوهش، تمامی خروجی‌های حاصل از تحلیل‌ها به صورت نمودار ارائه شده است که اولین لایه ژئوگرید در نمودارها، همان لایه (II) به فاصله ۳ متر از کف پی، می‌باشد.

### مقدار جابه‌جایی قائم پی

شکل (۶) مربوط به نتایج حاصل از کل مدل‌سازی‌ها می‌باشد که مقدار جابه‌جایی قائم اتفاق افتاده در پی، روی خاک تسلیح شده با دو نوع ژئوگرید و با فواصل قائم مختلف از هم را نشان می‌دهد. در نمودارها، در حالت (الف) محور افقی مربوط به تعداد لایه‌های ژئوگرید و در حالت (ب) محور افقی مربوط به عمق قرارگیری و فواصل قائم لایه‌های ژئوگرید از هم و محور قائم مربوط به مقدار جابه‌جایی قائم می‌باشد. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که اگر تعداد لایه‌های ژئوگرید افزایش یابد و هم‌زمان فاصله قائم بین آن‌ها کمتر شود، جابه‌جایی قائم اتفاق افتاده در پی، کاهش خواهد یافت. ولی اگر فاصله قائم بین لایه‌های ژئوگرید افزایش یابد، جابه‌جایی قائم اتفاق افتاده در پی، ابتدا کاهش می‌یابد و سپس چون فاصله بین لایه‌ها افزایش می‌یابد، رفته‌رفته جابه‌جایی قائم پی نیز شروع به افزایش می‌کند که این حالت به‌خوبی در نمودارها قابل مشاهده می‌باشد.



(ب)



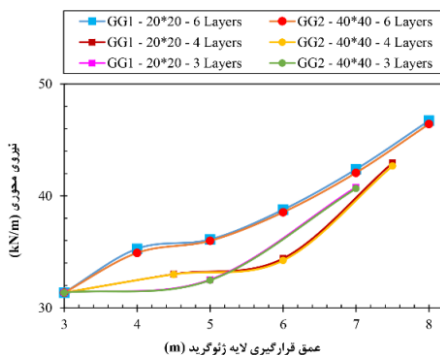
(الف)

الف) براساس تعداد لایه‌های ژئوگرید، ب) براساس عمق قرارگیری و فواصل قائم لایه‌های ژئوگرید

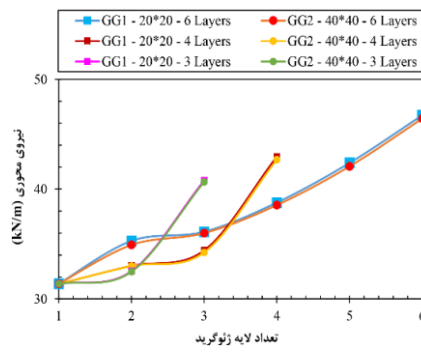
شکل ۶. نمودارهای نشان‌دهنده مقدار جابه‌جایی قائم پی.

### نیروی محوری وارد بر پی

در شکل (۷) مقدار نیروی محوری وارد بر سطح پی که برگرفته از نتایج تحلیل‌ها می‌باشد، ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ارائه‌شده، مشاهده می‌شود که در همه حالات، نمودارها صعودی هستند ولی همان‌طوری که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله قائم بین لایه‌های ژئوگرید، رفته‌رفته هم شیب نمودارها و هم مقدار نیروی محوری واردشده بر پی افزایش می‌یابد.



(ب)



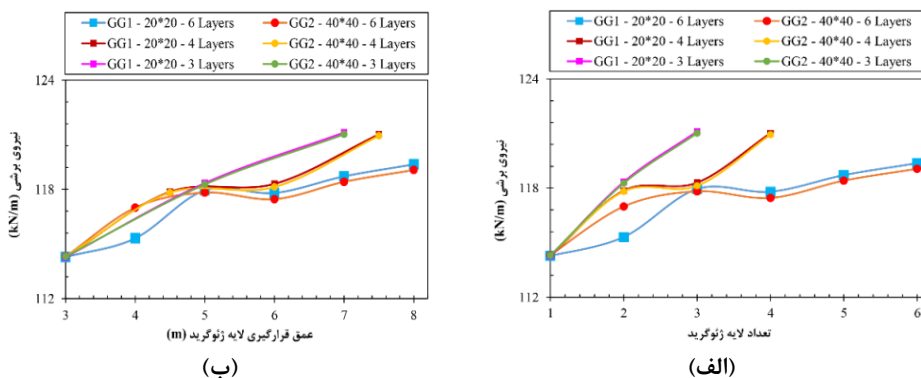
(الف)

الف) براساس تعداد لایه‌های ژئوگرید، ب) براساس عمق قرارگیری و فواصل قائم لایه‌های ژئوگرید

شکل ۷. نمودارهای نشان‌دهنده مقدار نیروی محوری وارد بر پی.

### نیروی برشی وارد بر پی

در شکل (۸) نمودارهای نیروی برشی وارد بر پی ارائه شده است. نتایج حاکی از آن می‌باشد که با افزایش فاصله قائم بین لایه‌های ژئوگرید، در همه حالات مقدار نیروی برشی واردشده بر پی افزایش می‌یابد و همچنین شیب حالت صعودی نمودارها تندتر می‌شود.



الف) براساس تعداد لایه‌های ژئوگرید، ب) براساس عمق قرارگیری و فواصل قائم لایه‌های ژئوگرید

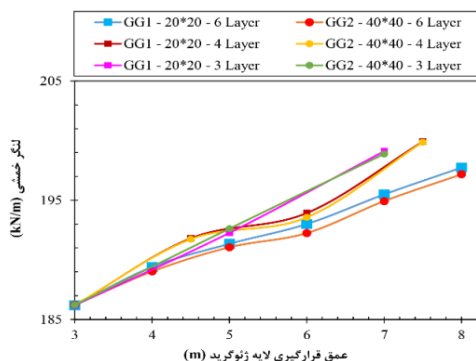
شکل ۸. نمودارهای نشان‌دهنده مقدار نیروی برشی وارد شده بر پی.

### لنگر خمشی وارد بر پی

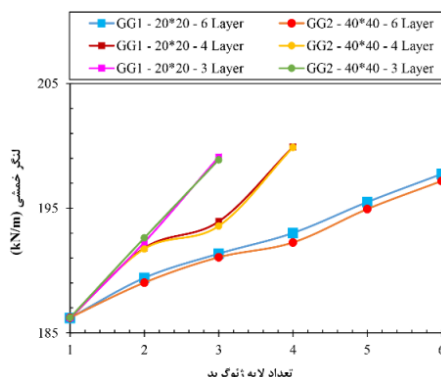
با توجه به نمودارهای ارائه‌شده در شکل (۹) که مربوط به لنگرهای خمشی وارد شده بر پی می‌باشد، به‌طور کلی در همه حالات، مقدار لنگر خمشی افزایش می‌یابد ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله قائم بین لایه‌های ژئوگرید، شیب نمودارهای در حال افزایش از حالت منحنی‌وار و ملایم به حالت خطی و تند تبدیل می‌شود.

### مقایسه نتایج به‌دست‌آمده

در این بخش برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده، بخشی از نتایج با یافته‌های کومار جین و همکارانش مقایسه خواهد شد. کومار جین و همکارانش (۲۰۲۰) برای تسلیح خاک‌های نرم زیر پی یک ساختمان در منطقه‌ای با عنوان کاتماندو، از صفحات ژئوگرید با اندازه چشمه‌های  $31 \times 31$  میلی‌متر و ستون‌های سنگی استفاده کردند. برای مدل‌سازی عددی نیز از یک پی به طول  $12/5$  متر که بار یکنواخت  $150$  کیلوپاسکال را تحمل می‌کند، در نظر گرفته شد. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که استفاده از صفحات ژئوگرید به همراه ستون‌های سنگی، یک راه‌حل بسیار مناسب برای کاهش نشست‌ها و افزایش ظرفیت باربری می‌باشد [۲۳] و سپس نمودار جابه‌جایی قائم در طول پی محاسبه و رسم گردید. در مطالعه حاضر، طول پی  $6$  متر می‌باشد و تحت بار یکنواخت  $90$  کیلوپاسکال می‌باشد که توسط لایه‌های ژئوگرید خاک زیر آن تسلیح شده است. در نمودار شکل ۱۰، مقدار جابه‌جایی قائم حاصل از این مطالعه با مقدار جابه‌جایی قائم مطالعه کومار جین و همکارانش مقایسه شده است. با توجه به نمودار ارائه‌شده، نتایج به‌دست‌آمده در هر دو مطالعه به یکدیگر نزدیک و قابل قبول می‌باشند.



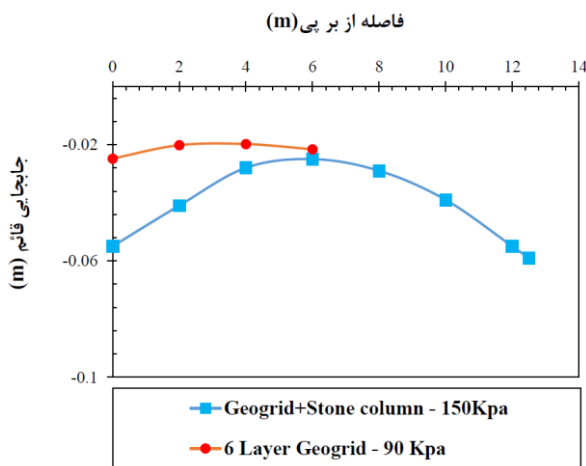
(ب)



(الف)

الف) براساس تعداد لایه‌های ژئوگرید، ب) براساس عمق قرارگیری و فواصل قائم لایه‌های ژئوگرید

شکل ۹. نمودارهای نشان‌دهنده مقدار لنگر خمشی وارد شده بر پی.



شکل ۱۰. نمودار مقدار جابه‌جایی قائم در طول پی. منحنی قرمز رنگ مربوط به مطالعه حاضر و منحنی آبی رنگ مربوط به مطالعه مقایسه شده می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

هدف اصلی از مطالعه حاضر، بررسی رفتار پی سطحی مستقر بر سه لایه خاکی متفاوت است که لایه میانی متشکل از خاک رسی سست می‌باشد و توسط لایه‌های متعددی از ژئوگرید تسلیح شده است. برای همین ۲۵ عدد مدل، نرم‌افزاری طراحی و تحلیل شد که مدل‌های طراحی شده به دو صورت: بدون لایه ژئوگرید و با لایه‌های ژئوگرید می‌باشند. در ادامه، نتایج حاصل از این تحلیل‌ها آورده شده است.

- ۱- مشاهده شد که با افزایش فاصله بین لایه‌های ژئوگرید، میزان جابه‌جایی قائم پی نیز رفته‌رفته افزایش می‌یابد و برعکس.
- ۲- در حالت کلی با افزایش فاصله بین لایه‌های ژئوگرید، میزان نیروی محوری وارد بر پی با شیب بیشتری افزایش می‌یابد.
- ۳- با افزایش فاصله بین لایه‌های ژئوگرید، میزان نیروی برشی وارد بر پی، از لایه ژئوگرید با عمق قرارگیری ۵ متر به بعد حالت خطی پیدا می‌کند و با شیب زیادی نسبت به دیگر حالت‌های بررسی شده افزایش می‌یابد.
- ۴- با افزایش فاصله بین لایه‌های ژئوگرید، منحنی نشان‌دهنده لنگر خمشی وارد بر پی، رفته‌رفته به یک خط راست با شیب زیاد، نسبت به دیگر حالت‌های مطالعه شده تبدیل می‌شود و به روند صعودی خود ادامه می‌دهد.
- ۵- همچنین مشاهده شد که استفاده از لایه ژئوگرید GG۱ یا GG۲ تأثیر چندانی بر نتایج تحلیل‌ها نخواهد داشت.

## References

- [1] Rajabi, A. M., & Heidari Abdollahi, A. (2019). The experimental study of the nano-silica effect on the strength and consolidation parameters of karaj clay soils. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 35.2(2.1), 65-72. <https://doi.org/10.24200/j30.2018.2007.2061>
- [2] Kumar, S., Sahu, A. K., & Naval, S. (2019). Performance of circular footing on expansive soil bed reinforced with geocells of Chevron pattern. *Civil Engineering Journal*, 5(11), 2333-2348. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091415>
- [3] Sridhar, R., & Prathapkumar, M. T. (2017). Behaviour of model footing resting on sand reinforced with number of layers of coir geotextile. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0099-y>
- [4] Huang, Y., Sawada, K., Moriguchi, S., Yashima, A., & Zhang, F. (2006). Numerical assessment of the effect of reinforcement on the performance of reinforced soil dikes. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(3), 169-174. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2005.11.005>
- [5] Patra, C. R., Das, B. M., Bhoi, M., & Shin, E. C. (2006). Eccentrically loaded strip foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4), 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2005.12.001>
- [6] Kolay, P., Kumar, S., & Tiwari, D. (2013). Improvement of bearing capacity of shallow foundation on geogrid reinforced silty clay and sand. *Journal of Construction Engineering*, 2013, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2013/293809>
- [7] Duncan-Williams, E., & Attoh-Okine, N. O. (2008). Effect of geogrid in granular base strength – An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 22(11), 2180-2184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.008>
- [8] Abdi, M., Sadmezhad, S., & Arjmand, M. (2009). Clay reinforcement using geogrid embedded in thin layers of sand. *International Journal of Civil Engineering* 7(4), 224-235. <http://ijce.iust.ac.ir/article-1-380-en.html>
- [9] Bathurst, R. J., & Miyata, Y. (2015). Reliability-based analysis of combined installation damage and creep for the tensile rupture limit state of geogrid reinforcement in Japan. *Soils and Foundations*, 55(2), 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.017>
- [10] Abu-Farsakh, M., Coronel, J., & Tao, M. (2007). Effect of Soil Moisture Content and Dry Density on Cohesive Soil-Geosynthetic Interactions Using Large Direct Shear

- Tests. *Journal of materials in civil engineering*, 19(7), 540-549. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:7\(540\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:7(540))
- [11] Siavoshnia, M., Kalantari, F., & Shakiba, A. (2010, April 26-28). *Assessment of geotextile reinforced embankment on soft clay soil*. The 1st International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University - Mashad Branch, Iran. <http://ctb.iau.ir/faculty/m-siavoshnia-civil/fa/articlesInConferences/324>
- [12] Karim, H. H., Samueel, Z. W., & Jassem, A. H. (2020). Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading. *Civil Engineering Journal*, 6(2), 225-237. [https://www.researchgate.net/publication/338994040\\_Behaviour\\_of\\_Soft\\_Clayey\\_Soil\\_Improved\\_by\\_Fly\\_Ash\\_and\\_Geogrid\\_under\\_Cyclic>Loading](https://www.researchgate.net/publication/338994040_Behaviour_of_Soft_Clayey_Soil_Improved_by_Fly_Ash_and_Geogrid_under_Cyclic>Loading)
- [13] Abd El Raouf, M. E. (2020). Stability of Geogrid Reinforced Embankment on Soft Clay. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 48(5), 830-844. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2020.112941>
- [14] El Sawwaf, M., & Nazir, A. K. (2010). Behavior of repeatedly loaded rectangular footings resting on reinforced sand. *Alexandria Engineering Journal*, 49(4), 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2010.07.002>
- [15] Ghosh, A., Ghosh, A., & Bera, A. K. (2005). Bearing capacity of square footing on pond ash reinforced with jute-geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(2), 144-173. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2004.07.002>
- [16] Sharma, R., Chen, Q., Abu-Farsakh, M., & Yoon, S. (2009). Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.07.002>
- [17] Brinkgreve, R. B. J., Broern, W., & Waterman, D. (2006). *Reference Manual for PLAXIS 2D version 8.0*. B. PLAXIS. [https://www.civil.iitb.ac.in/~ajuneja/Plaxis%20program/Version%208%20Introductory/Manuals/English/V84-1\\_GenInfo.pdf](https://www.civil.iitb.ac.in/~ajuneja/Plaxis%20program/Version%208%20Introductory/Manuals/English/V84-1_GenInfo.pdf)
- [18] Das, B. M., & Sobhan, K. (2012). *Principles of Geotechnical Engineering* (8 ed.). Cengage learning. <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583609876-principles-of-geotechnical-engineering-8th-das.pdf>
- [19] Cicek, E., Guler, E., & Yetimoglu, T. (2015). Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil. *Soils and Foundations*, 55(4), 661-677. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.06.001>
- [20] Huesker. (2017). *Basetrac® Duo-C PP 30 B15*. Huesker Synthetic GmbH. [https://www.huesker.co.uk/fileadmin/media/Tender\\_Specifications/English/Basetrac\\_Duo-C\\_P\\_P\\_30\\_B15.pdf](https://www.huesker.co.uk/fileadmin/media/Tender_Specifications/English/Basetrac_Duo-C_P_P_30_B15.pdf)
- [21] Huesker. (2017). *Basetrac® Duo-C PET 30 B15*. Huesker Synthetic GmbH. [https://www.huesker.co.uk/fileadmin/media/Tender\\_Specifications/English/Basetrac\\_Duo-C\\_PET\\_30\\_B15.pdf](https://www.huesker.co.uk/fileadmin/media/Tender_Specifications/English/Basetrac_Duo-C_PET_30_B15.pdf)
- [22] Huesker. (2017). *Basetrac® Duo PET 30 B15*. Huesker Synthetic GmbH. [https://www.huesker.co.uk/fileadmin/media/Tender\\_Specifications/English/Basetrac\\_Duo\\_PET\\_30\\_B15.pdf](https://www.huesker.co.uk/fileadmin/media/Tender_Specifications/English/Basetrac_Duo_PET_30_B15.pdf)
- [23] Jain, S. K., Nusari, M. S., & Acharya, I. P. (2020). WITHDRAWN: Use of geo-grid reinforcement and stone column for strengthening of mat foundation base. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.757>