



Assessment Behavior of Cojointed Footings System Placed on Sands Encased by Geocell Reinforcement: Experimental Study

P. Fazeli Dehkordi*

Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

ABSTRACT: Previous experiences indicate that employing cellular reinforcements (such as geocell) in the weak sands beneath footings has significant influence on the bearing pressure and their settlement. The increased structures' height and loads intensity lead to enhancement in the dimension of the footings and their spacing, thereby causing them to get closer to each other. Existing footings near each other create interaction problem that tends to change failure mechanism, the ability of load-carrying capacity and deformability. The behavior of nearby footings resting on sandy soils reinforced with 2D polymeric reinforcements has been elucidated in the literature; however, it has not been attended for cellular reinforcements. By keeping optimum geometry and location for cellular reinforcement embedded in the soil, the effect of spacing between footings on bearing capacity and settlement was studied. The results show that coupled effect of reinforcement and footing interference can enhance load carrying capacity by more than 300% and improve the settlement by more than 60% compared with single isolated footing on an unreinforced bed. Maximum bearing capacity is attained when two footings are beside. Spacing between footings more than three times of footing diameter represents substantial reduction in the interference effect and each footing almost acts as a single isolated footing.

Review History:

Received: Nov. 02, 2020

Revised: Apr. 15, 2021

Accepted: Aug. 26, 2021

Available Online: Aug. 31, 2021

Keywords:

Weak sands

Footings interference effect

Cellular reinforcement

Bearing capacity and settlement

Failure mechanism

1- Introduction

In the last decades, using polymeric reinforcements with cellular shapes such as geocell to improve the load-carrying capacity of weak soils supporting shallow footings has been attended by scientists. Many researchers have studied the behavior of single isolated shallow footings on geocell-reinforced soils using different methods [1-3]. The results showed that geocell enhances the bearing capacity and reduces the settlement of footings significantly.

In practice, footings are constructed close to each other due to applied heavy loads. The interference effect of the footings can change the bearing pressure, failure mechanism and footings tilt [4-7]. The interference influence of two nearby footings on planar reinforced soils (e.g., geogrid, geotextiles and etc.) has been investigated by several scientists [8-12]. However, the interference effect of multiple footings on reinforced sand with 3-dimensional cellular reinforcement [13] has not been greatly highlighted.

In the present study, two symmetric circular footings subjected to equal loads on geocell-reinforced sand are modeled using experimental tests. The impact of spacing between footings and geocell reinforcement on the performance of twin footings is evaluated.

2- Methodology

Poorly graded sand (SP) with an average grain size of 0.25 mm, internal friction angle $\phi=36^\circ$ at relative density $D_r=68\%$ and prefabricated geocell reinforcement (HDPE) with dimensions of $1050 \times 1050 \text{ mm}^2$ and average cell diameter of 183 mm were used in this study. The physical and mechanical properties of the geocell are depicted in Table 1.

Plate load tests were conducted on unreinforced as well as geocell-reinforced sand. A rigid square steel box with dimensions of $1100 \times 1100 \text{ mm}^2$ in plan and 1000 mm in height was manufactured for all tests. The tank was supported by a stiff reaction frame to distribute equal loads over two footings. The load with the rate of 10 mm/min was applied using pneumatic jack connected to the loading frame. Two rough base circular Teflon with diameter $D=150 \text{ mm}$ and thickness of 100 mm was used as footings. The raining technique was used to reach the required relative density for the sand bed. To ensure uniform density, the sand in the test tank was filled in 100 mm thick layers up to 900 mm. Geocell was placed at a depth of 0.1D which is the optimum location to achieve the maximum performance [14]. The applied load and footings displacement was measured respectively using a pre-calibrated load cell and two Linear Variable Differential Transducers (LVDTs) installed on each footing. Both load cell and LVDTs were connected to a data logger. The pressure-

*Corresponding author's email: p_fazeli@iaushk.ac.ir



Table 1. Geocell characteristics

Geocell properties	Values
Geocell material	Polyethylene
Size of cell, (mm)	250×210
Thickness of Strip, (mm)	1.5
Height of cell, (mm)	150
Short term yield resistance, (kN/m)	21
Density, (gr/cm ³)	0.94
Elastic modulus, (MPa)	270

Table 2. Summary of laboratory test results for single and two circular footings on unreinforced and geocell-reinforced sand

Reinforce ment	Δ/D	BC* (kPa)	BCR	ζ
Unrein. N=0	Single	137	-	-
	$\Delta/D=1$	242	-	1.77
	$\Delta/D=2$	206	-	1.50
	$\Delta/D=3$	173	-	1.26
Rein. N=1	Single	232	1.69	-
	$\Delta/D=1$	433	1.79	1.87
	$\Delta/D=2$	352	1.71	1.52
	$\Delta/D=3$	287	1.66	1.24

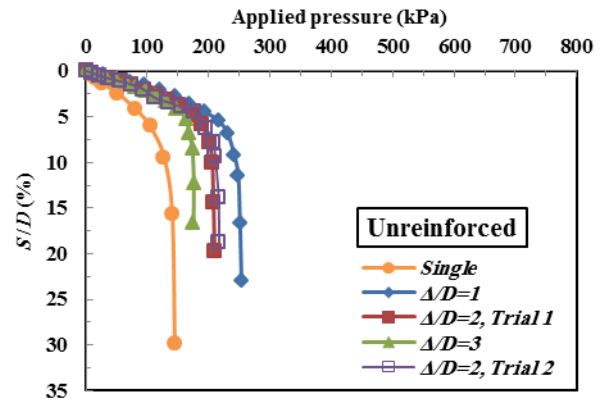
*BC=ultimate bearing capacity at $S/D=10\%$

settlement curves were generated from the average settlement of the footings. The ultimate bearing capacity was measured from the curves corresponding to 10% footing width ($S/D=10\%$).

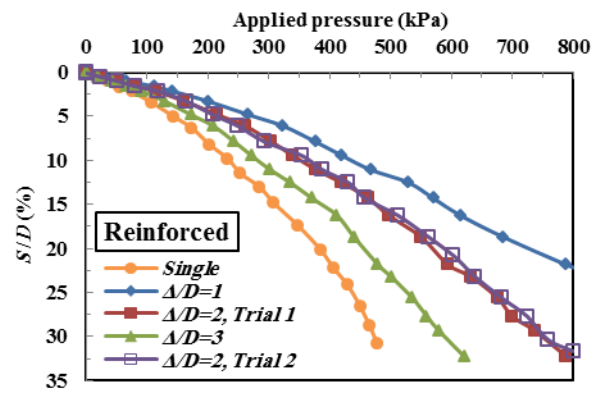
Generally, 11 tests were conducted on single and twin footings. Four tests were conducted on unreinforced and four experiments were also performed on geocell-reinforced sand. To verify the accuracy of the test data, three tests were repeated two times resulted in 4% deviations in the results.

3- Results and discussion

The bearing pressure curves for two closely spaced footings on unreinforced sand are presented in Figure 1a. As can be observed, the bearing capacity of twin footings is larger than that of single footing due to the interference effect. Maximum bearing capacity occurs when two footings are beside (e.g., $\Delta/D=1$ in which Δ is the distance between two footings from center-to-center). At $\Delta/D=1$ bearing capacity of twin, footings



(a)



(b)

Fig. 1. Pressure- settlement variation of two closely-spaced circular footing on the sand bed for various d/D ratios; (a) unreinforced, (b) reinforced

are approximately 77% greater than those obtained from single footing at the same condition. By increasing spacing between footings, the impact of interference reduces. When $\Delta/D=3$ each footing almost acts as a single isolated footing without interference effect.

The pressure-settlement response for two adjacent footings on geocell-reinforced sand is shown in Figure 1b. As expected, the footing bearing capacity on the reinforced bed is greater than those obtained from the unreinforced bed. No clear failure point is seen in reinforced soils due to distributing footings load by the geocell over a wider surface and linear behavior of the geocell even at higher pressure. In reinforced cases, the ultimate bearing capacity ($S/D=10\%$) of twin footings at $\Delta/D=1$ is approximately 85% greater than single footing on the same bed.

To elucidate the interference effect on the bearing capacity of two nearby footings, the following non-dimensional factor can be defined as:

$$\zeta = \frac{q_{u-int.-N}}{q_{u-single-N}} \quad (1)$$

here, $q_{u-int.-N}$ is the ultimate bearing capacity of a footing in the presence of other footings on unreinforced/reinforced sand, $q_{u-single-N}$ is the ultimate bearing capacity of a single isolated footing on the same bed and N is the number of reinforcements. To study the influence of reinforcement on the ultimate bearing capacity of single/twin footings, the following non-dimensional factor is introduced as:

$$BCR = \frac{q_{u-Rein.b}}{q_{u-Unrein.b}} \quad (2)$$

where, $q_{u-Rein.b}$ and $q_{u-Unrein.b}$ are, respectively ultimate bearing capacity of single/twin footings on the reinforced and unreinforced bed. Table 2 presents test results and non-dimensional factors for single and two nearby footings.

4- Conclusion

In the present study, the behavior of two closely spaced shallow circular footings subjected to equal loads over geocell-reinforced sand was investigated. Using laboratory tests, the impact of spacing ratio (S/D) and geocell reinforcement on the efficiency and load-carrying capacity of single and twin footings was elucidated. The following concluding remarks may be extracted from this study:

1) Geocell reinforcement can enhance the bearing pressure of two interfering circular footings beyond 80% compared to the same condition on an unreinforced bed. It depends on soil characteristics, geocell reinforcement and spacing ratio of the footings.

2) Combination influence of interference and geocell reinforcement raise the bearing capacity by more than 300% compared to those obtained from single isolated footing on unreinforced sand.

3) Maximum bearing capacity of twin circular footings on geocell-reinforced soil takes place when two footings are next to each other ($\Delta/D=1$). The interference effect disappears at approximately $\Delta/D=3$. This result is also presumable for unreinforced cases.

References

- [1] A. Hegde, Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: A state-of-the-art review, *Construction and Building Materials*, 154 (2017) 658-674.
- [2] P. Fazeli Dehkordi, U.F.A. Karim, Behaviour of circular footings confined by rigid base and geocell reinforcement, *Arabian Journal of Geosciences*, 13(20) (2020) 1100.
- [3] P. Fazeli Dehkordi, M. Ghazavi, N. Ganjian, Evaluation Behavior of Circular Footings Located on Sand Bed Reinforced with Geocell. *Amir Kabir Journal of Civil Engineering*, 53(5) doi:10.22060/CEEJ.2020.17159.6479.
- [4] J.G. Stuart, Interference Between Foundations, with Special Reference to Surface Footings in Sand, *Géotechnique*, 12(1) (1962) 15-22.
- [5] P. Fazeli Dehkordi, U.F.A. Karim, M. Ghazavi, N. Ganjian, Stochastic analysis of the capacity of two parallel footings on a thin sand layer, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 172(4) (2019) 355-364.
- [6] C. Schmödderich, A.A. Lavasan, F. Tschuchnigg, T. Wichtmann, Behavior of Nonidentical Differently Loaded Interfering Rough Footings, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 146(6) (2020) 04020041.
- [7] M. Ghazavi, P. Fazeli Dehkordi, Interference influence on behavior of shallow footings constructed on soils, past studies to future forecast: A state-of-the-art review, *Transportation Geotechnics*, 27 (2021) 100502.
- [8] K.H. Khing, B.M. Das, S.C. Yen, V.K. Puri, E.E. Cook, Interference effect of two closely-spaced shallow strip foundations on geogrid-reinforced sand, *Geotechnical and Geological Engineering*, 10(4) (1992) 257-271.
- [9] A.A.L. Mahmoud Ghazavi, Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics, *Geotextiles and Geomembranes*, 26 (2008) 404-415.
- [10] N. Biswas, P. Ghosh, Interaction of adjacent strip footings on reinforced soil using upper-bound limit analysis, *Geosynthetics International*, 25(6) (2018) 599-611.
- [11] S. Saha Roy, K. Deb, Closely spaced rectangular footings on sand over soft clay with geogrid at the interface, *Geosynthetics International*, 25(4) (2018) 412-426.
- [12] S. Saha Roy, K. Deb, Effect of aspect ratio of footing on behavior of two closely-spaced footings on geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4) (2020) 443-453.
- [13] P. Fazeli Dehkordi, M. Ghazavi, N. Ganjian, U.F.A. Karim, Effect of geocell-reinforced sand base on bearing capacity of twin circular footings, *Geosynthetics International*, 26(3) (2019) 224-236.
- [14] S.K. Dash, N.R. Krishnaswamy, K. Rajagopal, Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 19(4) (2001) 235-256.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

P. Fazeli Dehkordi, Assessment Behavior of Cojointed Footings System Placed on Sands Encased by Geocell Reinforcement: Experimental Study, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 211-214.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19194.7102](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19194.7102)





ارزیابی رفتار سیستم شالوده‌های همجوار متکی بر ماسه‌های مقید شده با مسلح کننده ژئوسل: مطالعه آزمایشگاهی

پژمان فاضلی دهکردی*

گروه عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

کلمات کلیدی:

ماسه‌های سست
اثر همجواری شالوده‌ها
مسلح کننده سلولی
ظرفیت باربری و نشست
مکانیسم گسیختگی

خلاصه: تجربیات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از مسلح کننده‌های سلولی در ماسه‌های ضعیف تاثیر قابل ملاحظه‌ای در فشار باربری و نشست شالوده‌های واقع بر این نوع بسترها دارد. با افزایش شدت بارها و ارتفاع سازه‌های در نزدیکی یکدیگر، ابعاد شالوده‌ها افزایش یافته و فاصله میان آن‌ها نزدیک‌تر می‌شود. قرار گرفتن شالوده‌ها در مجاورت یکدیگر سبب ایجاد اثر متقابل آن‌ها بر یکدیگر و در نتیجه تغییر مکانیسم گسیختگی، قابلیت باربری و نشست‌پذیری آن‌ها می‌گردد. رفتار شالوده‌های همسایه واقع بر خاک‌های ماسه‌ای مسلح شده با مسلح کننده‌های دو بعدی در ادبیات تخصصی همواره مطالعه شده است ولی این شرایط برای مسلح کننده‌های سلولی کمتر مورد توجه بوده است. از این جهت، در این مطالعه تاثیر همجواری دو شالوده دایروی متقارن واقع بر ماسه نیمه متراکم تسلیح شده با ژئوسل مورد ارزیابی قرار گرفته است. با حفظ هندسه و موقعیت بهینه ثابت برای ژئوسل در خاک بستر، اثر تغییر فاصله بین شالوده‌ها بر میزان باربری و نشست آن‌ها مطالعه شده است. نتایج حاکی از آن است که وجود مسلح کننده سه بعدی در ترکیب با اثر همجواری شالوده‌ها می‌تواند باربری را بیش از ۳۰۰٪ و نشست را تا بیش از ۶۰٪ نسبت به یک شالوده منفرد مشابه واقع بر بستر غیرمسلح بهبود دهد. حداکثر باربری در حالتی به دست آمد که دو شالوده کاملا در مجاورت یکدیگر واقع شده باشند. زمانی که فاصله بین شالوده‌ها از سه برابر قطر شالوده بیشتر می‌شود اثر همجواری کاهش قابل توجهی داشته و هر کدام از شالوده‌ها تقریباً رفتاری مشابه یک شالوده منفرد را خواهند داشت.

سطح وسیع‌تر و مقاومت خمشی و برشی بالاتر، با ایجاد اثرات محصور کنندگی همه جانبه و جلوگیری از حرکت جانبی خاک زیر شالوده، توان باربری بستر را به نحو مطلوبی افزایش می‌دهد [۹]. به همین جهت استفاده از این نوع مسلح کننده‌ها در بهسازی بسترهای خاکی نسبت به مسلح کننده‌های تخت نظیر ژئوگرید، ژئوتکستایل و غیره ارجحیت یافته است. با افزایش شدت بارها و ارتفاع سازه‌ها، شالوده‌ها به یکدیگر نزدیک شده و این مساله منجر به اثر متقابل آن‌ها بر روی یکدیگر می‌شود [۱۰]. در این حالت ناحیه‌های تحت تاثیر تنش در زیر هر کدام از شالوده‌ها با یکدیگر متداخل شده و در نتیجه تغییرات ظرفیت باربری، نشست و قابلیت دوران شالوده‌ها را به دنبال دارد [۱۱-۱۶]. اخیراً رفتار شالوده‌های متداخل واقع بر بسترهای خاکی به صورت جامعی توسط قضاوی و فاضلی دهکردی [۱۷] با مرور و جمع‌بندی تحقیقات گذشته و همچنین خلاءهای تحقیقاتی موجود مورد بررسی قرار گرفته است. جمع‌بندی تحقیقات پیشین مبین آن است که زمانی که شالوده‌های همجوار در فاصله نزدیکی نسبت به یکدیگر قرار

۱- مقدمه

استفاده از مسلح کننده‌های پلیمری به خصوص مسلح کننده‌های سلولی مانند ژئوسل جهت تسلیح خاک‌های کم تراکم و به منظور بهبود رفتار شالوده‌های سطحی در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات انجام شده بر روی این مسلح کننده‌ها مبین آن است که ژئوسل می‌تواند توان باربری و قابلیت نشست‌پذیری خاک‌های واقع در زیر شالوده‌ها را به نحو مطلوبی بهبود دهد. این روش نسبت به بسیاری از روش‌های تثبیت خاک می‌تواند اقتصادی‌تر، سریع‌تر و آسان‌تر باشد. پژوهشگران زیادی به تفسیر پاسخ رفتار مسلح کننده‌های سلولی را در شالوده‌های واحد و منفرد با روش‌های متعدد [۱] بررسی نمودند و برخی از این تحقیقات نشان می‌دهد که مسلح کننده‌های سلولی حتی در مقاصد عملی نیز عملکرد مناسبی را در این زمینه از خود نشان می‌دهند [۹-۲]. در واقع مسلح کننده‌های سلولی در مقایسه با مسلح کننده‌های تخت و دو بعدی علاوه بر توزیع بهتر بار روی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: p_fazeli@iaushk.ac.ir



جدول ۱. مشخصات ماسه مصرفی

Table 1. Sand characteristics

مشخصه	مقدار
D_{10} (mm), اندازه موثر	۰/۱۷
D_{50} (mm), اندازه متوسط	۰/۲۵
C_c , ضریب انحناء	۰/۸۴
C_u , ضریب یکنواختی	۱/۶۵
γ_d (kN/m ³), وزن مخصوص خشک	۱۵/۶۲
e_{min} , نسبت تخلخل حداقل	۰/۵۳
e_{max} , نسبت تخلخل حداکثر	۰/۹۱
ϕ (degree), زاویه اصطکاک داخلی	۳۶
G_s , چگالی ویژه	۲/۶۳

۲- مصالح

۲-۱- مشخصات مصالح

ماسه

در این مطالعه از ماسه نسبتا ریز و خشک به عنوان مصالح خاکی استفاده شده است. مطابق با نتایج آزمایش دانه‌بندی، مصالح موجود بر مبنای سیستم طبقه‌بندی متحد (ASTM D2487-11 [۳۴]) به عنوان ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) نام‌گذاری می‌گردد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه مذکور در جدول شماره ۱ ارائه شده است. مقدار زاویه اصطکاک داخلی این ماسه توسط آزمایش سه محوری زهکشی شده (با استاندارد ASTM D7181-11 [۳۵]) محاسبه گردیده است. این آزمون سه بار تکرار شده و متوسط زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های با تراکم نسبی $D_r=68\%$ و میزان تخلخل $e=0.652$ استخراج شده است. حداکثر و حداقل وزن مخصوص ماسه به ترتیب با استفاده از استانداردهای ASTM D4253-16 [۳۶] و ASTM D4254-16 (روش A) [۳۷] تعیین شده است.

مسلح کننده ژئوسل

مسلح کننده سلولی مورد استفاده، یک ژئوسل پیش ساخته پلی اتیلنی (HDPE) از نوع تجاری با مشخصات مندرج در جدول ۲ می‌باشد. جداره مسلح کننده به شکل سوراخ دار و زبر بوده و قطر سوراخ‌های دیواره برابر با ۱۰ mm و همچنین فاصله مرکز به مرکز این سوراخ‌ها برابر با

دارند به واسطه تداخل تنش‌های زیر شالوده‌ها با یکدیگر، توان باربری و نشست‌پذیری آن‌ها افزایش یافته و شالوده‌ها دچار دوران خواهند شد.

رفتار شالوده‌های همجوار متکی بر بسترهای ماسه‌ای ضعیفی که توسط مسلح کننده‌های پلیمری تسلیح گردیده‌اند توسط محققین مختلفی برای شالوده‌های دو بعدی [۲۴-۱۸] و همچنین سه بعدی [۳۱-۲۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع تمرکز این مطالعات بر روی تاثیر مسلح کننده‌های دو بعدی مانند ژئوگرید، ژئوتکستایل و غیره بر افزایش توان باربری این نوع شالوده‌ها و بهبود رفتار خاک بستر می‌باشد. نتایج این تحقیقات حاکی از آن است که در شالوده‌های همجوار گوشه‌دار (مربعی/ مستطیلی/ نواری) واقع بر بسترهای مسلح، حداکثر باربری زمانی به وقوع می‌پیوندد که دو شالوده در یک فاصله معین (فاصله بحرانی) از یکدیگر واقع شده باشند، در حالی که در شالوده‌های همجوار دوار (دایروی و رینگی) حداکثر توان باربری زمانی حاصل گردیده است که دو شالوده کاملا مماس بر یکدیگر قرار دارند.

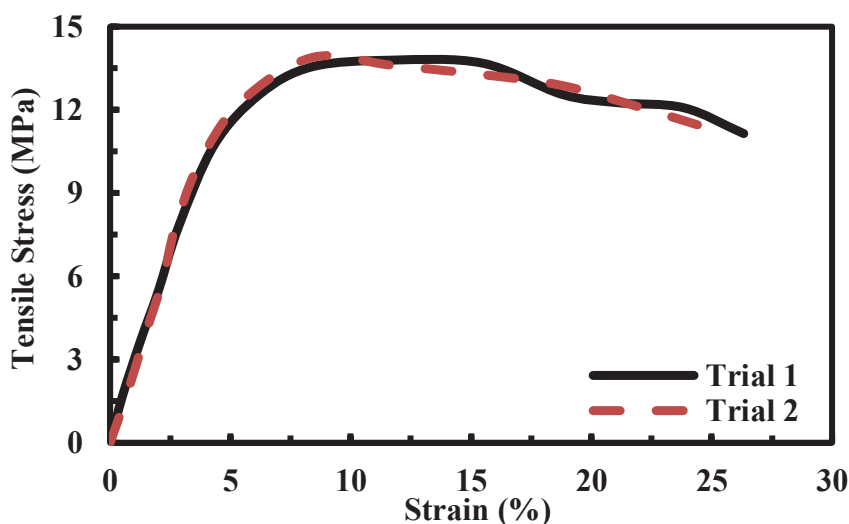
در خصوص عملکرد شالوده‌های همجوار واقع بر خاک‌های تسلیح شده با مسلح کننده‌های سلولی مانند ژئوسل‌ها اطلاعات زیادی در دسترس نمی‌باشد. گوپتا و همکاران [۳۲] رفتار شالوده‌های مربعی همجوار واقع بر بسترهای رسی مسلح شده با ژئوسل را با مطالعه آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند و نتایج این تحقیق نشان داد که ژئوسل می‌تواند باعث تغییر نه چندان زیادی در رفتار شالوده‌های مربعی همجوار متکی بر بسترهای رسی شود. فاضلی دهکردی و همکاران [۳۳] رفتار شالوده‌های همجوار متکی بر ماسه با ضخامت نازک و تسلیح شده با مسلح کننده‌های سلولی واقع بر یک بستر صلب را مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که ضخامت بستر ماسه‌ای و لایه صلب واقع در زیر آن می‌تواند کارایی ژئوسل و همچنین بزرگای اثر متقابل شالوده‌ها را کاملا تغییر دهد.

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که بررسی اثر همجواری شالوده‌ها و مسلح کننده ژئوسل به عنوان دو عامل محصور کنندگی بر توان باربری شالوده‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این مطالعه عملکرد شالوده‌های دایره‌ای همجوار متقارن واقع بر بسترهای ماسه‌ای نیمه متراکم مسلح شده با مسلح کننده سلولی بررسی شده است. در واقع تمرکز این پژوهش بر روی: (۱) بررسی تاثیر فاصله بین شالوده‌ها بر توان باربری آن‌ها در شرایط بستر مسلح و غیرمسلح، (۲) ارزیابی عملکرد مسلح کننده سلولی در مقایسه با سایر مسلح کننده‌های دو بعدی در رفتار شالوده‌های همجوار، (۳) تعیین میزان راندمان و نسبت ظرفیت باربری شالوده‌های دوقلوی واقع بر بستر مسلح در مقایسه با شرایط شالوده‌های واحد متکی بر بستر غیرمسلح می‌باشد.

جدول ۲. خصوصیات ژئوسل مورد استفاده در آزمون‌ها

Table 2. Geocell characteristics used in the tests

پارامترها	کمیت
Polymer	Polyethylene
اندازه چشمه‌ها (mm)	۲۵۰×۲۱۰
ضخامت نوارها (mm)	۱/۵
چگالی (gr/cm ³)	۰/۹۴
ارتفاع چشمه‌ها (mm)	۱۵۰
مقاومت تسلیم (kN/m)	۲۱
مدول ارتجاعی (MPa)	۲۷۰



شکل ۱. منحنی تنش- کرنش ژئوسل

Fig. 1. Stress- strain curve of geocell

ژئوسل در زمان انجام آزمون کشش برابر با ۱۰٪/min در نظر گرفته شد و آزمون تا زمان گسیختگی ژئوسل ادامه یافت. پارامترهای مقاومت تسلیم و مدول ارتجاعی ژئوسل نیز از نمودار مذکور معین شده است. مدول الاستیسیته ژئوسل از شیب ناحیه الاستیک منحنی (مدول تانژانتی) محاسبه گردیده است. سایر مشخصات فیزیکی ژئوسل با توجه به کاتالوگ شرکت سازنده استخراج شده است.

۱۲ mm است. سطح مقطع چشمه‌های ژئوسل برابر با ۲۶۲۰۰ mm² و قطر دایره معادل هر چشمه d=۱۸۳ mm است که از جوش خوردن و کنار هم قرار گرفتن چشمه‌ها، یک لایه ژئوسل یکنواخت تشکیل می‌گردد. مقاومت کششی مسلح کننده با دو بار انجام آزمون توسط یک دستگاه کشش^۱ کالیبره شده مطابق با استاندارد ASTM D4885-11 [۳۸] معین و منحنی تنش- کرنش آن در شکل شماره ۱ دیده می‌شود. نرخ کرنش

1 Tensile Testing Machine

۳- مدل‌سازی فیزیکی و روش انجام آزمون‌ها

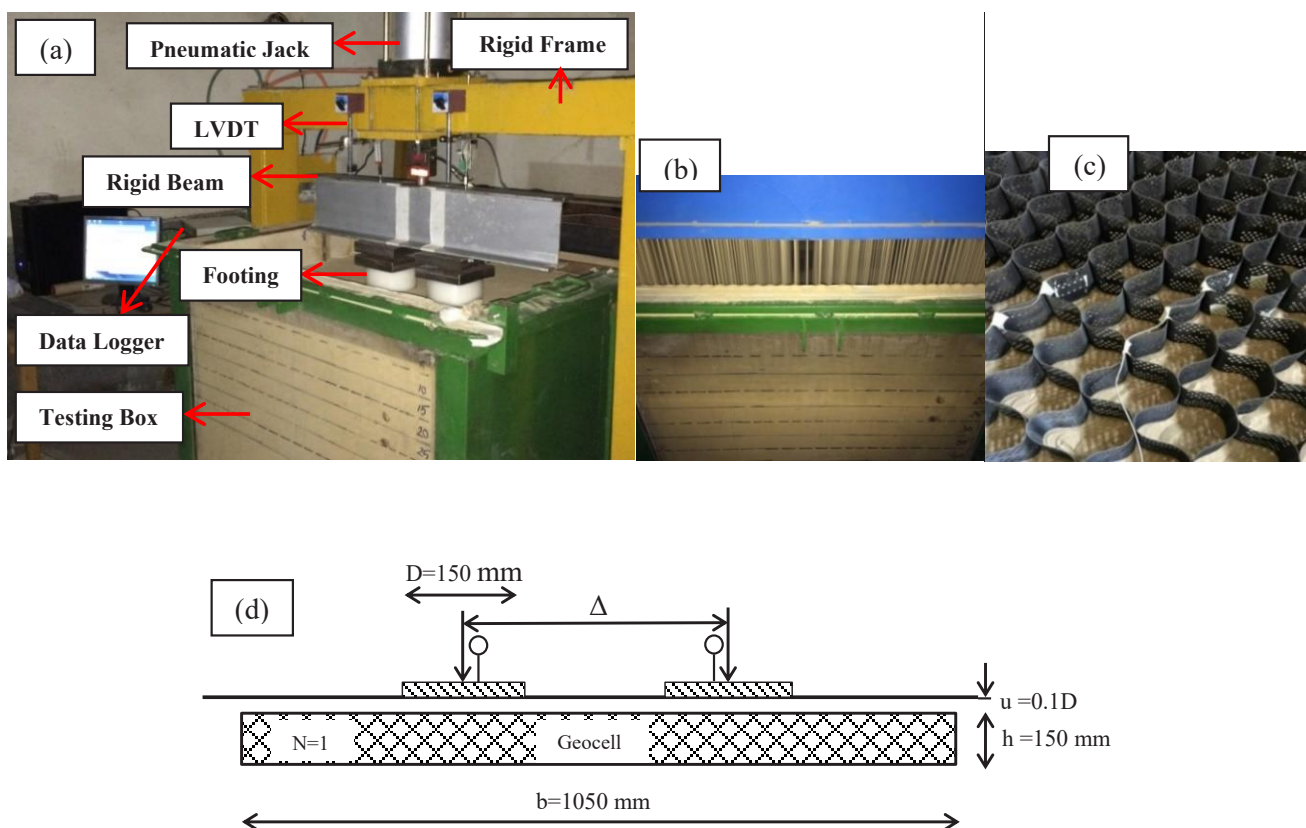
۳-۱- ساخت مدل

در مطالعه حاضر مدل‌سازی فیزیکی جهت انجام آزمون بارگذاری صفحه برای دو شالوده همجوار واقع بر بستر غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل انجام پذیرفته است. ابعاد جعبه بارگذاری متناظر با قطر شالوده (D) به گونه‌ای انتخاب گردید که اثرات مرزی بر روی رفتار شالوده تحت بارگذاری قابل چشم‌پوشی باشد [۳۹]. همچنین، افزایش ابعاد مخزن منجر به افزایش انرژی و زمان لازم برای آماده‌سازی و تخلیه مخزن خواهد شد. لذا جهت دستیابی به ابعاد بهینه جعبه آزمون، آنالیز حساسیت با استفاده از مدل‌سازی اولیه در نرم افزار ۳D Flac [۴۰] مشابه آنالیز انجام شده توسط نادری و هاتف [۲۷] صورت پذیرفت. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن بود که افزایش ابعاد بیشتر از مقادیر اشاره شده برای مخزن، تاثیری در باربری شالوده‌ها ندارد. ابعاد به گونه‌ای کنترل و تعیین شد که تنش در نزدیکی مرزها (بدنه مخزن) برابر با صفر باشد. به همین جهت ابعاد جعبه آزمایش برابر با $1100 \times 1100 \text{ mm}^2$ در سطح و 1000 mm در ارتفاع در نظر گرفته شد و خاکریزی در داخل مخزن تا ارتفاع 900 mm ادامه یافت. از سوی دیگر مطابق با نظر کودوتو و همکاران [۴۱] در فاصله جانبی حدود $1/5$ برابر قطر شالوده از لبه آن و عمق نزدیک به ۲ برابر قطر شالوده از کف آن، شدت تنش نفوذی در درون خاک نزدیک به صفر خواهد بود. لذا بر این اساس حداقل اندازه مورد انتظار جهت مخزن آزمایش در حالتی که فاصله مرکز به مرکز دو شالوده در مخزن برابر با D3 باشد معادل 1050 mm می‌باشد. مطابق با تحلیل‌های نرم افزاری، عمق نفوذ تنش به حدود $5D$ نیز می‌رسد که این نتیجه به واسطه اثرات تنش متقابل دو شالوده بر یکدیگر و نفوذ تنش تا اعماق بیشتر است. جعبه مدل آزمون از ورق فلزی ضخیم تشکیل شده که جهت حصول اطمینان از میزان صلبیت آن، جداره جعبه توسط پشت بندها و تسمه‌های فولادی مهار و به یکدیگر متصل شده‌اند. به منظور تامین عکس العمل مربوط به نیروی اعمالی، این جعبه به یک قاب فلزی صلب متصل گردید. بر روی این قاب یک جک بادی (پنوماتیک) با ظرفیت حدود 50 kN نصب شده که با یک کمپرسور بادی حمایت می‌شود (شکل ۲). به منظور رعایت اثرات مقیاس، جهت مدل‌سازی شالوده‌ها از پلاستیک تفلونی صلب به ضخامت 100 mm

و به قطر $D=150 \text{ mm}$ استفاده شد. لازم به ذکر است قطر شالوده‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که هر شالوده توسط دیواره‌های هر چشمه ژئوسل کاملاً احاطه شده است و آزمون‌ها به گونه‌ای انجام پذیرفت که مرکز شالوده دقیقاً منطبق بر مرکز یک سلول ژئوسل قرار گیرد. محصور شدگی به واسطه کوچک‌تر بودن قطر شالوده‌ها از قطر هر چشمه ژئوسل، امکان ایجاد اثرات موضعی را در زمان بارگذاری افزایش می‌دهد [۴۲] ولی به هر حال کلیات نتایج و اساس کار می‌تواند تا حدودی رفتار شالوده‌ها را در مقیاس واقعی آن‌ها با رعایت قوانین مقیاس^۱ پیش‌بینی نماید [۴۳]. همچنین محققین مختلفی رفتار بستر مسلح شده با ژئوسل را تحت بارگذاری شالوده‌های منفرد با قطر کوچک‌تر از یک چشمه ژئوسل مورد بررسی قرار داده‌اند [۴۴-۴۶]. جهت تامین زبری کف هر کدام از شالوده‌ها از یک کاغذ سمباده کاملاً زبر استفاده گردید که این کاغذها توسط چسب به کف شالوده‌ها چسبیده شده است.

در ساخت مدل فیزیکی تلاش شد تا راستای اعمال بار در طول انجام آزمون به صورت کاملاً عمودی و فارق از هرگونه خروج از مرکزیت بر روی شالوده باشد. جهت حفظ راستای انتقال بار در طول بارگذاری و ایجاد اتصال مفصلی و همچنین آزادی دوران در هر کدام از شالوده‌ها، از دو صفحه فلزی کاملاً صلب استفاده شد که در وسط هر یک از این صفحات یک نیم کره مقعر کاملاً صیقلی ایجاد و در مابین این نیمکره‌ها یک کره دایره‌ای قرار گرفته است و جهت کاهش اثرات اصطکاک، اطراف نیم کره‌های مذکور توسط گریس روغن کاری شد. با توجه به قطر پایین شالوده‌ها میزان دوران در هر کدام از شالوده‌ها ناچیز بوده [۲۷] و بدین جهت از اندازه‌گیری آن صرف‌نظر شد. به واسطه تیر صلب موجود بر روی شالوده‌ها، بار با نرخ ثابت 10 mm/min به نسبت مساوی به شالوده‌ها اعمال و شدت بار اعمالی توسط یک سلول اندازه‌گیری بار^۲ به ظرفیت 50 kN و با دقت $\pm 0.01\%$ معین شد (شکل ۲). جهت اندازه‌گیری تغییر مکان شالوده‌ها در زمان بارگذاری، از دو تغییر مکان سنج خطی^۳ با دقت $\pm 0.01\%$ و طول اندازه‌گیری 100 mm واقع بر شالوده‌ها استفاده و متوسط نشست شالوده‌ها توسط این دو تغییر مکان سنج اندازه‌گیری شد. تغییر مکان سنج‌ها و همچنین سلول اندازه‌گیری بار به یک دستگاه ثبت دیجیتال^۴ جهت ثبت اطلاعات مربوط به بارها و تغییر مکان‌ها متصل گردید.

- 1 Scaling Laws
- 2 Load cell
- 3 LVDTs
- 4 Data logger



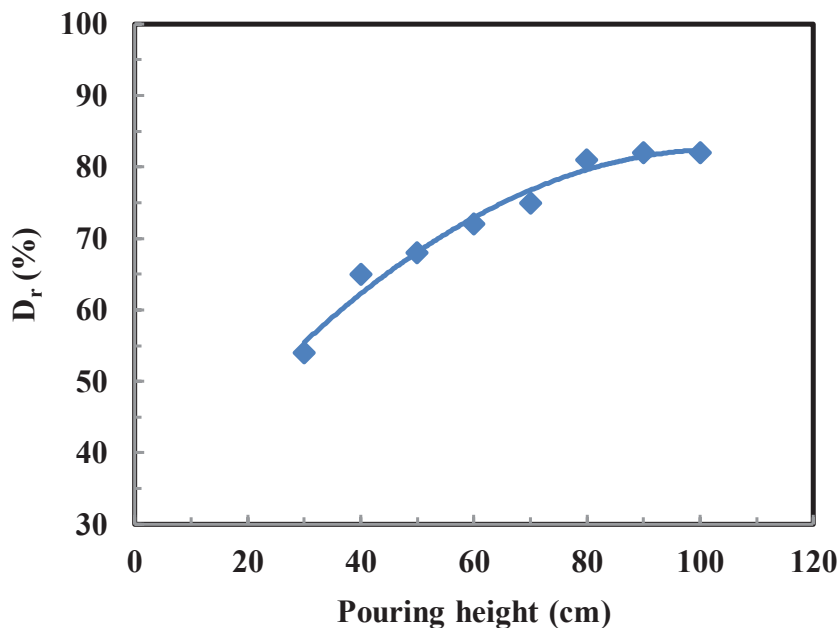
شکل ۲. تصاویری از مدل‌سازی فیزیکی جهت انجام آزمون‌ها: (a) مدل آزمون آماده شده جهت بارگذاری شامل شالوده‌ها، سلول اندازه‌گیری بار و تغییر مکان‌سنج‌ها، (b) بارش ماسه درون جعبه، (c) ژئوسل تجاری مدفون شده در بستر، (d) نمای جانبی مدل فیزیکی و اندازه‌ها

Fig.2. Experimental model for tests; (a) loading setup including footings, load cell and LVDTs, (b) geocell reinforcement embedded in the soil bed, (c) sand raining in the box, (d) schematic of cross sectional of physical model and dimensions

۳-۲- روش انجام آزمایش

جهت ایجاد تراکم نسبی مورد نظر در بستر ماسه‌ای از روش بارانی^۱ استفاده شد و مطابق با شکل ۳ با سعی و خطا، ارتفاع سقوط مورد نیاز برای ماسه تا رسیدن به تراکم مورد نظر محاسبه گردید. بدین جهت از ارتفاع 500 mm سقوط ماسه انجام و جهت حصول اطمینان از تراکم یکنواخت، خاکریزی در لایه‌های به ضخامت 100 mm تا تراز مورد نظر در جعبه آزمون انجام شد و این روش جهت تامین تراکم خاک درون چشمه‌های ژئوسل نیز دنبال گردید. جهت کنترل تراکم در مخزن از ظروف کوچک آزمایشگاهی مستقر در نقاط مختلف جعبه استفاده گردید و با توجه به حجم مشخص ظروف و وزن خاک درون آن‌ها، میزان تراکم در ظروف اندازه‌گیری شد. این مساله برای لایه‌های خاک متعددی در مخزن بررسی و کنترل گردید. در هر لایه تراکم نسبی تولید شده در جعبه آزمون در دامنه $68 \pm 5\%$

متناظر با وزن واحد حجم $15/62\text{ kN/m}^3$ حاصل شد که این میزان تراکم می‌تواند در دامنه تراکم متوسط خاک‌ها قرار گیرد. بر اساس پیشنهاد پش^۲ [۴۷] خاک‌های با این دامنه تراکم می‌توانند جهت مسلح کردن مناسب باشند. بر اساس توصیه‌های موجود در مطالعات پیشین، جهت ایجاد حداکثر کارایی ژئوسل، ابعاد آن $1050 \times 1050\text{ mm}^2$ و عمق مدفون آن $D/8$ در نظر گرفته شد [۴۸]. با توجه به قطر معادل ژئوسل، میزان ارتفاع (h) و اندازه چشمه ژئوسل (d) بر حسب تابعی از قطر شالوده به ترتیب برابر با $h/D=1$ ، $d/D=1/22$ می‌باشند. از آنجایی که ژئوسل مورد استفاده به صورت پیش ساخته و تجاری است لذا ایجاد مقادیر بهینه برای نسبت‌های بی بعد h/D و d/D مهیا نمی‌باشد. در طول انجام آزمون، افزایش بار تا نسبت نشست تقریباً $S/D=25\%$ ادامه یافته و میزان ظرفیت باربری شالوده‌ها متناظر با نشست معادل 10% قطر آن‌ها ($S/D=10\%$) [۴۹] اندازه‌گیری شد.



شکل ۳. منحنی ارتفاع سقوط ماسه بر حسب میزان تراکم نسبی حاصل شده برای بستر

Fig. 3. Curve of sand fall height in term of relative density obtained from rainy method

۴- تحلیل نتایج آزمون‌ها

۴-۱- تعاریف مقادیر بی‌بعد

به منظور ایجاد سهولت در ارائه نتایج آزمون‌ها و ارزیابی توامان اثر مسلح کننده و فاصله بین شالوده‌ها بر توان باربری، فاکتور بی‌بعد نسبت ظرفیت باربری (BCR) به صورت ذیل قابل تعریف می‌باشد:

$$BCR = \frac{q_{u-Rein.b}}{q_{u-Unrein.b}} \quad (1)$$

که در این رابطه $q_{u-Unrein.b}$ ظرفیت باربری نهایی در نشست $S/D=10\%$ شالوده منفرد یا همجوار واقع بر بستر غیرمسلح و $q_{u-Rein.b}$ ظرفیت باربری همان شالوده واقع بر بستر مسلح در همان میزان نشست می‌باشد.

در این مطالعه ۱۱ آزمون آزمایشگاهی انجام شده است که ۵ آزمون در شرایط غیرمسلح و ۶ آزمون در شرایط مسلح صورت پذیرفته است. تعداد ۳ آزمون بر روی شالوده منفرد و سایر آزمون‌ها بر روی شالوده‌های دوقلو انجام پذیرفته است (جدول ۳). در شالوده‌های دوقلو، فاصله بین شالوده‌ها به عنوان متغیر اصلی منظور گردید و نسبت فاصله بین آن‌ها در بازه $\Delta/D=1-3$ تغییر داده شد. مطابق با مطالعات گذشته، در شالوده‌های دایروی شکل در مقادیر $\Delta/D > 3$ اثرات تداخل پی‌های همجوار قابل توجه نخواهد بود [۲۶]. این مساله می‌تواند ناشی از کاهش اثرات محصور شدگی خاک در حد فاصل دو شالوده دایروی در مقایسه با شالوده‌های زاویه‌دار باشد. در راستای صحت‌سنجی و اطمینان بخشی به نتایج آزمون‌ها، تکرارپذیری بر روی برخی از آزمون‌ها انجام شده است. بررسی تکرار آزمون‌ها در حدود ۴٪ انحراف در نتایج حاصل شده را نشان می‌دهد که این میزان تغییرپذیری در مقاصد عملی مهندسی ژئوتکنیک قابل قبول تلقی می‌گردد.

جدول ۳. برنامه انجام آزمایش‌ها

Table 3. Test schedules

هدف آزمون‌ها	تعداد آزمون‌ها	Δ/D	نوع مسلح کننده	نوع شالوده	سری‌های آزمون
جهت ایجاد نمونه مرجع	۱	-	غیرمسلح	منفرد	۱
جهت بررسی اثر مسلح کننده در شالوده منفرد	۱+۱*	-	مسلح	منفرد	۲
مقایسه نتایج باربری شالوده دابل نسبت به منفرد غیرمسلح	۳+۱*	۱ و ۲ و ۳	غیرمسلح	دابل	۳
مقایسه نتایج باربری شالوده دابل مسلح نسبت شالوده‌های منفرد (مسلح و غیرمسلح) و همچنین شالوده دوقلو غیرمسلح	۳+۱*	۱ و ۲ و ۳	مسلح	دابل	۴

* به منظور صحت سنجی نتایج آزمون‌ها، برخی از آزمون‌های مدل دو بار تکرار شده است

که در این روابط $q_{u-int.-N}$ ظرفیت باربری یک شالوده منفرد در حضور شالوده دیگر واقع بر بستر مسلح ($N=1$) و یا در غیاب آن ($N=0$) و $q_{u-single-N}$ ظرفیت باربری همان شالوده در شرایط منفرد متکی بر همان بستر می‌باشد.

۴-۲- اثر مسلح کننده بر توان باربری شالوده‌های منفرد

اطلاعات مربوط به منحنی تنش-نشست برای آزمون‌های سری اول و دوم در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. ظرفیت باربری نهایی متناظر با نشست برابر با ۱۰٪ قطر شالوده ($S/D=10\%$) محاسبه شده است. همان‌گونه که از نمودارهای شکل ۴ نیز مشخص می‌باشد ظرفیت باربری نهایی شالوده واقع بر بستر غیرمسلح برابر با ۱۳۷ kPa می‌باشد در حالی که این مقدار برای بستر مسلح برابر با ۲۳۲ kPa نمایان می‌باشد. این نتایج حاکی از افزایش توان باربری شالوده منفرد واقع بر بستر مسلح به میزان ۷۰٪ نسبت به شرایط غیرمسلح است. تغییرات نمودارهای بستر مسلح و غیرمسلح نشان می‌دهد که در بستر غیرمسلح، نقطه گسیختگی و تغییرات ناگهانی نمودار بار-نشست به وضوح دیده می‌شود که این مساله ناشی از وجود رفتار خمیری خاک در سطح فشارهای بالا می‌باشد. این در حالی است که در نمودار مربوط به بستر مسلح تغییرات ناگهانی در رفتار نمودار مشاهده نشده و نمودار از یک روند نسبتاً ثابت پیروی می‌نماید و نقطه گسیختگی واضحی بر روی نمودار دیده نمی‌شود. در واقع در این نمودار کاهش میزان باربری با یک شیب ملایمی در حال وقوع می‌باشد و این مساله ناشی از ادامه رفتار الاستیک بستر خاکی مسلح حتی در سطوح تنش بالا است [۵۰].

جهت بررسی تاثیر مسلح کننده سلولی بر بهبود نشست شالوده‌ها، پارامتری بعد PRS^1 به شکل زیر تعریف شده است:

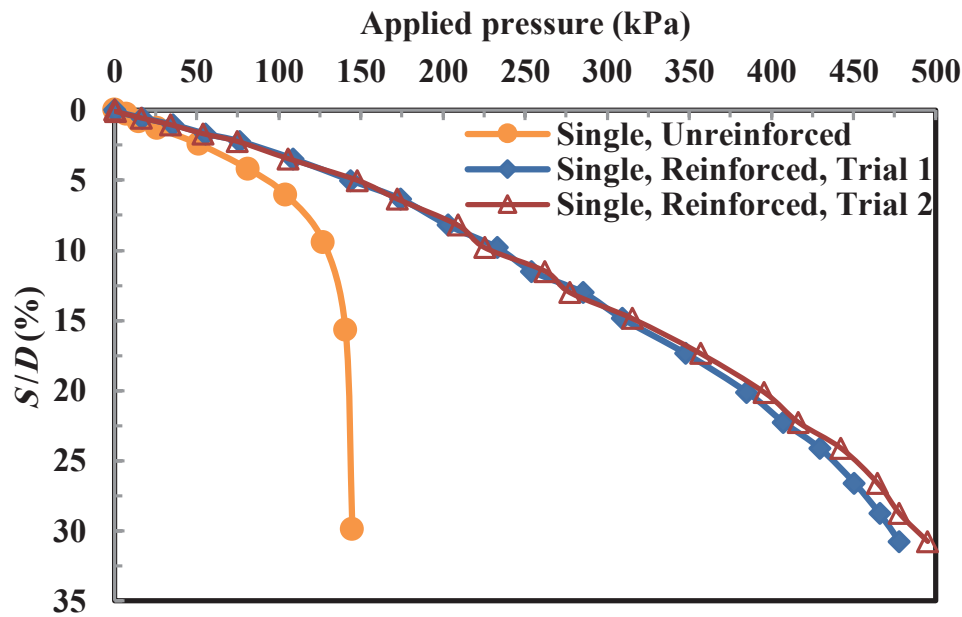
$$PRS = \left(\frac{S_{Unrein.} - S_{Rein.}}{S_{Unrein.}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه S_{unrein} میزان نشست شالوده در بار نهایی ($S/D=10\%$) در بستر غیرمسلح و متناظر با ظرفیت باربری نهایی و S_{Rein} نشست همان شالوده واقع بر بستر مسلح متناظر با ظرفیت باربری نهایی بستر غیرمسلح می‌باشد. جهت ارزیابی اثر همجواری و تاثیر مسلح کننده در رفتار شالوده‌ها، دو فاکتور بی بعد ضریب همجواری (ζ) و ضریب بهبود ظرفیت باربری (I_f) به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\zeta = \frac{q_{u-int.-N}}{q_{u-single-N}} \quad (3)$$

$$I_f = \frac{q_{u-int.-N=1}}{q_{u-single-N=0}} \quad (4)$$

1 Percentage Reduction Settlement



شکل ۴. تغییرات منحنی‌های تنش-نشست برای شالوده دایره‌ای منفرد واقع بر بستر ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل

Fig. 4. Pressure-settlement variation for single isolated circular footing placed on unreinforced and geocell-reinforced sand bed

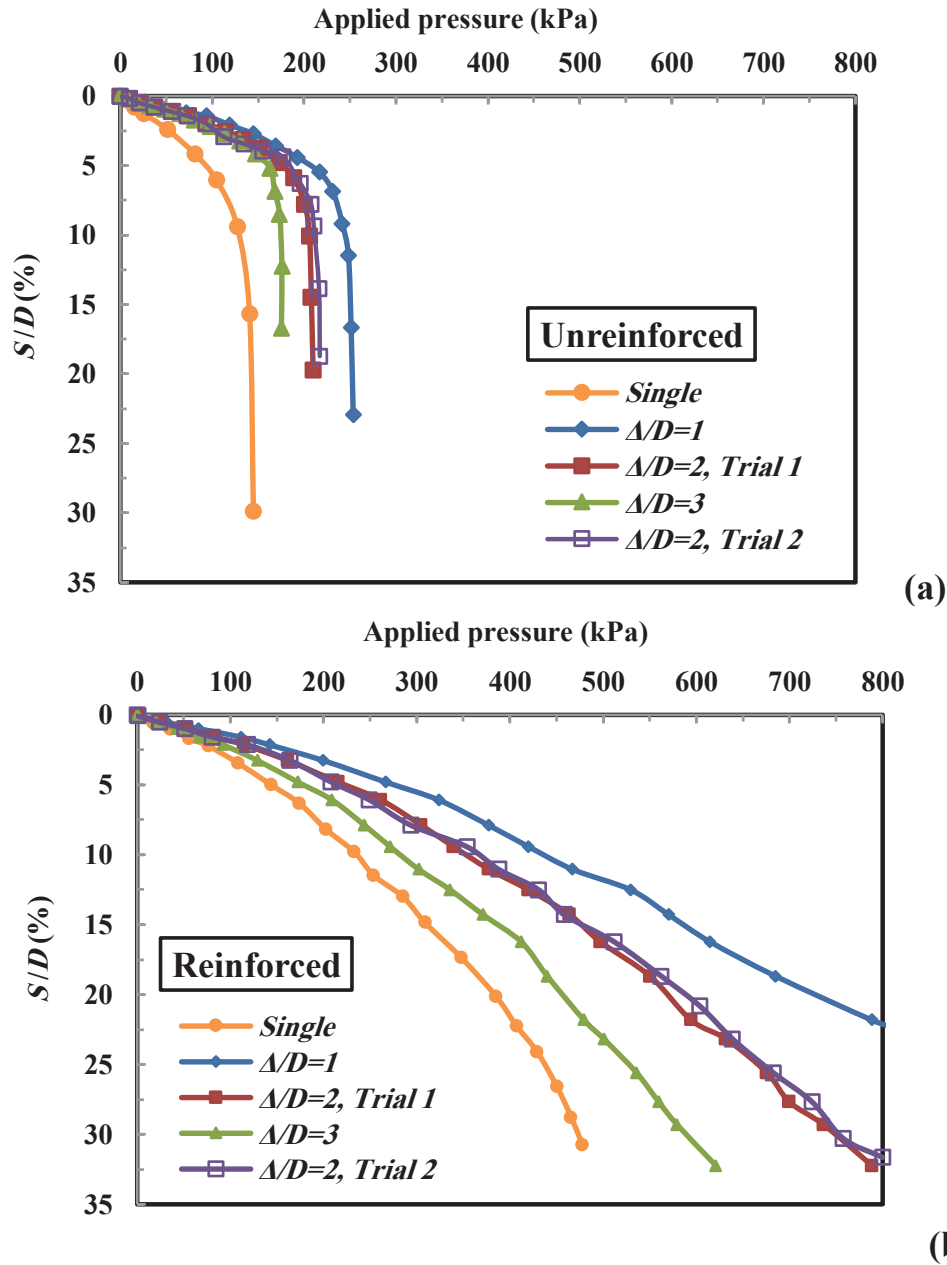
محصور شدگی خاک در حد فاصل دو شالوده منجر به افزایش ظرفیت باربری شالوده‌های همجوار می‌گردد. همان‌گونه که از شکل a5 دیده می‌شود حداکثر ظرفیت باربری شالوده‌ها زمانی حاصل می‌شود که دو شالوده کاملاً در کنار همدیگر قرار گرفته باشند ($D/\Delta=1$). با افزایش فاصله میان شالوده‌ها تاثیر همجواری آن‌ها کمتر و با کاهش فاصله میان آن‌ها این تاثیر افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات گذشته برای شالوده‌های همجوار دوار گونه واقع بر بسترهای مسلح دو بعدی نظیر ژئوگرید نیز روند مشابهی را نشان می‌دهد [۲۶-۲۸]. زمانی که $D/\Delta > 3$ باشد هر کدام از شالوده‌های همجوار تقریباً رفتاری مشابه یک شالوده منفرد دارد بدین معنی که پدیده همجواری در این نسبت تاثیر مهمی بر توان باربری شالوده‌ها ندارد. فرم کلی منحنی‌های تنش-نشست در شالوده‌های همجوار واقع بر بستر غیرمسلح مشابه شالوده‌های منفرد واحد واقع بر همان بستر می‌باشد با این تفاوت که باربری بیشتر در میزان نشست کمتر به وقوع پیوسته است. نقطه عطف و تغییرات انحنای ناگهانی نمودارها در شالوده‌های همجوار نیز بیانگر پلاستیک شدگی خاک زیر شالوده تحت فشارهای بالاتر می‌باشد. از آنجایی که شکل شالوده‌ها دوار می‌باشد پدیده بلوکی شدن در فاصله بحرانی در خاک میان شالوده‌ها [۱۰] مشاهده نگردد. به عبارت دیگر پدیده بلوکی شدن صرفاً برای

در واقع مسلح کننده سلولی باعث توزیع فشار شالوده بر روی سطح وسیع‌تر شده (اثر توزیع جانبی^۱) و با ایجاد محصور کنندگی بیشتر و جلوگیری از حرکت جانبی خاک به واسطه وجود چشمه‌های آن (اثر محصور کنندگی^۲) و همچنین جلوگیری از افزایش تغییر شکل‌های قائم بستر به واسطه صلبیت خمشی و مقاومت برشی آن (اثر مقاومت خمشی^۳)، توان باربری بستر را به شکل امیدوار کننده‌ای افزایش و مقادیر نشست را نیز به نحو مناسبی کاهش می‌دهد.

۳-۴ اثر مسلح کننده و همجواری شالوده‌ها بر توان باربری بستر

تغییرات منحنی‌های تنش-نشست برای دو شالوده همجوار دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای غیرمسلح در نسبت فاصله‌های مختلف بین دو شالوده در شکل a5 مشاهده می‌گردد. همان‌گونه که انتظار می‌رود ظرفیت باربری شالوده‌های همجوار نسبت به شالوده منفرد مشابه، افزایش قابل توجهی دارد که این نتیجه ناشی از اثر همجواری شالوده‌ها می‌باشد. در واقع تداخل سطوح گسیختگی دو شالوده، اثر متقابل آن‌ها نسبت به یکدیگر و همچنین

- 1 Lateral dispersion effect
- 2 Confinement effect
- 3 Membrane effect



شکل ۵. تغییرات منحنی تنش- نشست برای دو شالوده دایره‌ای همجوار واقع بر بستر ماسه‌ای در نسبت‌های مختلف d/D : (a) حالت غیر مسلح، (b) حالت مسلح

Fig. 5. Pressure- settlement variation of two closely-spaced circular footings on sand bed for various d/D ratios; (a) unreinforced, (b) reinforced

باربری شالوده‌های همجوار به میزان ۷۷٪ بزرگ‌تر از باربری شالوده‌های منفرد در شرایط یکسان بستر خاکی است. این در حالی است که در شرایط $\Delta/D=3$ این نسبت باربری به حدود ۲۵٪ کاهش می‌یابد. مسلماً در نسبت‌های فواصل بیشتر میان شالوده‌ها، رفتار هر کدام از پی‌های همجوار به یک پی منفرد نزدیک می‌شود.

شالوده‌های زاویه‌دار (مربعی / مستطیلی / نواری) همجوار اتفاق می‌افتد که در این حالت حداکثر باربری شالوده‌ها زمانی به وقوع می‌پیوندد که دو شالوده در یک فاصله معین از یکدیگر واقع شده باشند. این فاصله در مطالعات پیشین تقریباً برابر با $1/5$ برابر قطر شالوده ($\Delta/D=1/5$) گزارش شده است و تابعی از زاویه اصطکاک داخلی و عرض شالوده می‌باشد. در شرایط $\Delta/D=1$

جدول ۴. خلاصه نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی برای شالوده منفرد و دو شالوده دایره‌ای واقع بستر ماسه‌ای در شرایط غیرمسلح و مسلح

Table 4. Summary of laboratory test results for single and two circular footings on unreinforced and geocell-reinforced sand

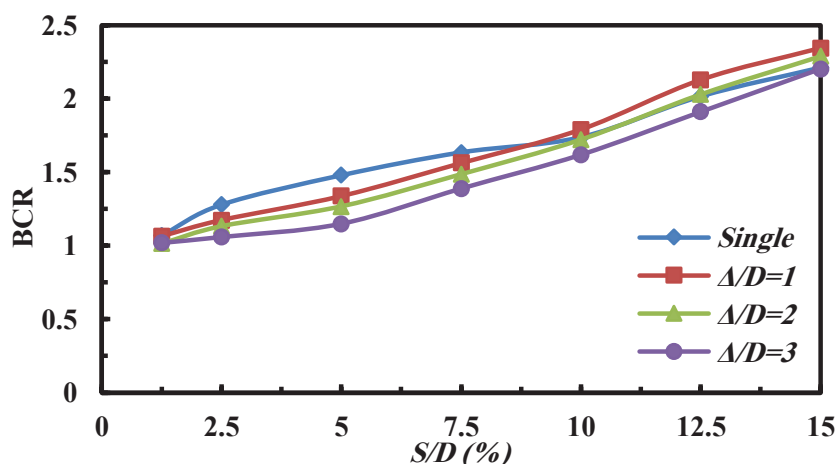
نوع مسلح کننده	فاصله میان شالوده‌ها	ظرفیت باربری (kPa) (S/D=۱۰٪)	BCR رابطه (۱)	PRS (%) رابطه (۲)	ζ رابطه (۳) و (۴)
غیرمسلح N=۰	منفرد	۱۳۷	-	-	-
	Δ /D=۱	۲۴۲	-	-	۱/۷۷
	Δ /D=۲	۲۰۶	-	-	۱/۵۰
	Δ /D=۳	۱۷۳	-	-	۱/۲۶
مسلح N=۱	منفرد	۲۳۲	۱/۶۹	۵۸	-
	Δ /D=۱	۴۳۳	۱/۷۹	۶۳	۱/۸۷
	Δ /D=۲	۳۵۲	۱/۷۱	۶۱	۱/۵۲
	Δ /D=۳	۲۸۷	۱/۶۶	۵۳	۱/۲۴

جدول ۴ خلاصه نتایج باربری شالوده‌های منفرد و همجوار را برای دو حالت بستر مسلح و غیرمسلح نشان می‌دهد. همانطور که از این جدول مشخص است ضریب همجواری برای بستر مسلح اندکی بیشتر یا برابر با حالت غیرمسلح می‌باشد. به عبارت دیگر در حالتی که حداکثر تداخل میان شالوده‌ها وجود دارد (Δ/D=۱) ضریب همجواری حالت مسلح در حدود ۵٪ نسبت به حالت غیرمسلح افزایش یافته است. این اختلاف در نسبت‌های فاصله بیشتر میان شالوده‌ها ناچیز بوده و قابل اغماض می‌باشد. در نتیجه می‌توان قضاوت نمود که مسلح کننده اثرات چشمگیری در تغییرات ضریب همجواری نسبت به شرایط غیرمسلح ندارد. این نتیجه تقریباً برای نسبت‌های مختلف فاصله میان شالوده‌ها معتبر است. علاوه بر آن، نسبت ظرفیت باربری (BCR) نیز در شالوده‌های همجوار اندکی بالاتر یا برابر با این نسبت در شالوده منفرد است که این مساله می‌تواند ناشی از اثر همجواری و تاثیر تداخل تنش‌ها در زیر شالوده‌ها باشد. این مساله در خصوص درصد بهبود نشست (PRS) نیز صدق می‌نماید.

۴-۴- اثر نشست شالوده‌ها بر نسبت باربری BCR

شکل ۶ تغییرات پارامتر BCR را بر حسب S/D در نسبت‌های مختلف Δ/D نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش مقدار S/D تا میزان ۱۵٪، نسبت BCR تا مقدار ۲/۴ افزایش می‌یابد. در شالوده‌های همجوار نسبت BCR برای Δ/D=۱ بزرگ‌تر از سایر نسبت‌های Δ/D می‌باشد که این مساله ناشی از اثر متقابل بیشتر بین شالوده‌ها در این نسبت

اثر همجواری شالوده‌ها برای بسترهای مسلح شده با ژئوسل در شکل b5 نشان داده شده است. مشابه شرایط بستر غیرمسلح، در حالت بستر مسلح نیز شالوده‌های همجوار دارای باربری به مراتب چشمگیرتری نسبت به شالوده‌های منفرد هستند. این مساله در شرایطی که Δ/D=۱ می‌باشد بسیار نمایان‌تر است. این نکته حائز اهمیت است که در شرایط Δ/D=۱ ظرفیت باربری شالوده‌های متکی بر بستر مسلح نسبت به یک شالوده منفرد واقع بر همان بستر بیش از ۸۵٪ افزایش می‌یابد در حالی که در شرایط Δ/D=۳ این نسبت تقریباً به ۲۵٪ نزدیک می‌شود. در کنار ظرفیت باربری، مقادیر نشست نیز در شرایط شالوده‌های همجوار نسبت به شالوده منفرد بهبود یافته‌اند. نشست شالوده‌های همجوار واقع بر بستر مسلح در شرایط Δ/D=۱ نزدیک به ۹٪ نسبت به شالوده منفرد در همان بستر بهبود یافته است. مشابه با شرایط بستر غیرمسلح، در بستر مسلح نیز روند کلی نمودارهای تنش-نشست در شالوده‌های همجوار مانند شالوده‌های واحد متکی بر همان بستر است. عدم انحنای جدی و عدم وجود یک نقطه عطف مشخص بر روی نمودارها بیانگر عدم پلاستیک شدگی خاک حتی در محدوده فشارهای بالا می‌باشد. این نتیجه حاکی از آن است که ژئوسل حتی در محدوده فشارهای بالا نیز با عملکرد الاستیکی که از خود به جا می‌گذارد اجازه پلاستیک شدن خاک و خلق نشست‌های بزرگ در زیر شالوده‌های همجوار را نمی‌دهد. بر خلاف نتایج حاصل از باربری بستر غیرمسلح، در شرایط مربوط به بستر مسلح، ژئوسل پلاستیک شدگی و گسیختگی خاک زیر شالوده را حتی در مقادیر نشست‌های بزرگ، به تاخیر می‌اندازد.



شکل ۶. تغییرات BCR در مقابل نشست نسبی برای دو شالوده دایره‌ای

Fig. 6. Variation of BCR in term of settlement ratio for two circular footings

شرایط غیرمسلح (شکل a۷) می‌باشد. این نتیجه نشان دهنده عملکرد مسلح کننده سلولی مدفون شده در خاک است که مانع از ایجاد گسیختگی کامل در خاک زیر شالوده می‌شود. بنابراین این گونه استنباط می‌شود که مکانیسم گسیختگی در بسترهای مسلح می‌تواند متفاوت از بسترهای غیرمسلح باشد و مسلح کننده در رسیدن سطوح شکست به سطح زمین مداخله می‌نماید.

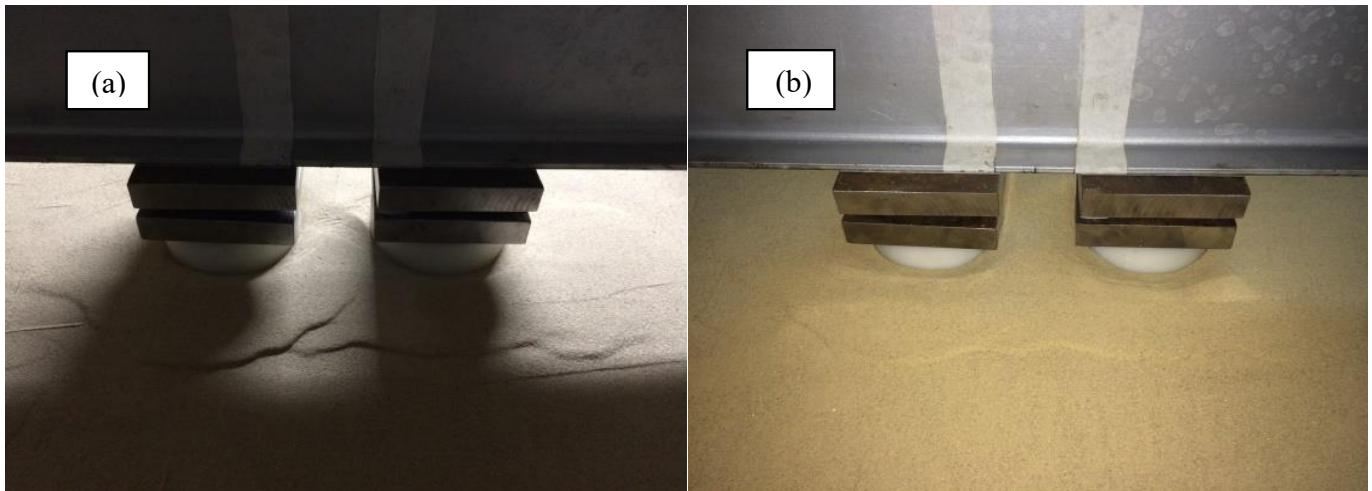
۶- مقایسه نتایج

نتایج مربوط به نسبت باربری BCR و ضریب همجواری (ب) برگرفته از مطالعه حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده در گذشته مقایسه و جزئیات آن در شکل ۸ دیده می‌شود. با توجه به شکل مذکور سنخیت مناسبی بین نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج به دست آمده از مطالعات سایر محققین وجود دارد. علت اختلاف اندک بین برخی نتایج حاصل از تحقیقات پیشین با مطالعه حاضر می‌تواند ناشی از اختلاف بین مشخصات مصالح، فرض نقطه گسیختگی بر روی منحنی‌های بار- تغییر مکان، اثر مقیاس، ابعاد شالوده‌ها و همچنین مقاومت، هندسه و نوع مسلح کننده مورد استفاده باشد. نتایج نسبت BCR حاصل از مسلح کننده سلولی به نتایج سایر مسلح کننده‌های دو بعدی نزدیک می‌باشد (شکل a۸) و همچنین ضریب همجواری برای بسترهای با مسلح کننده سلولی به مراتب بزرگ‌تر از بسترهای با مسلح کننده دو بعدی است (شکل c و b۹) که این نتایج نشان از کارایی بیشتر مسلح کننده سلولی در مقایسه با سایر مسلح کننده‌ها است. این مساله تقریباً در تمامی نسبت‌های فاصله بین دو شالوده دیده می‌شود. در واقع افزایش ضریب همجواری در

فاصله است. در واقع مسلح کننده مدفون در زیر شالوده‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای بر میزان باربری خاک داشته است و این اثر در مقادیر نشست‌های بزرگ‌تر شالوده، بیشتر نمایان می‌شود. روند کلی نمودارهای BCR حاصل شده برای شالوده‌های همجوار تقریباً مشابه شالوده‌های منفرد متکی بر همان نوع بستر می‌باشد. همچنین نمودارهای BCR در نسبت‌های بزرگ‌تر S/D دارای شیب تندتری می‌باشند که این مساله نشان دهنده کارایی بیشتر ژئوسل در مقادیر نشست‌های بزرگ‌تر شالوده‌ها است. به عبارت دیگر راندمان ژئوسل در مقادیر نشست‌های بزرگ به مراتب بیشتر از راندمان آن در نسبت نشست‌های کوچک بوده و نسبت BCR با افزایش میزان نشست‌ها با شیب تندی افزایش می‌یابد. در اکثر نمودارها در مقادیر نسبت نشست‌های کمتر از ۵٪ شیب منحنی‌ها ملایم‌تر از شرایط نسبت نشست‌های بیش از ۵٪ می‌باشد. نسبت BCR در شالوده منفرد نسبت به شالوده‌های همجوار، تقریباً به حالتی نزدیک است که دو شالوده در مجاورت همدیگر واقع شده باشند ($\Delta/D=1$).

۵- مکانیسم گسیختگی

وضعیت بالازدگی خاک اطراف شالوده‌های همجوار تحت بارگذاری که در فاصله $\Delta/D=2$ از یکدیگر قرار دارند در میزان نشست نهایی ($S/D=10\%$) در دو حالت مسلح و غیرمسلح در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل‌ها دیده می‌شود، میزان بالازدگی خاک اطراف شالوده در شرایط بستر مسلح (شکل b۷) کمتر از حالت مشابه آن در



شکل ۷. مقایسه بالا زدگی خاک اطراف شالوده‌های هم‌جوار در نقطه گسیختگی ($S/D=10\%$) در شرایط $\Delta/D=2$ ، (a) بستر غیر مسلح، (b) بستر مسلح

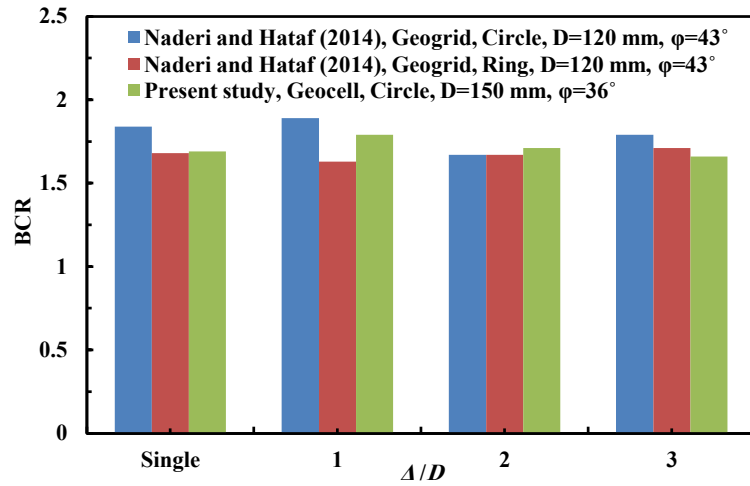
Fig. 7. Comparison of upward deformation around two closely spaced circular footings due to loading up to failure point ($S/D=10\%$) for $\Delta/D=2$ in condition of; (a) unreinforced bed, (b) reinforced bed

شالوده با قطر ثابت، یک نوع مشخص از مسلح کننده با یک هندسه ثابت (b/D, d/D, h/D) در موقعیت ثابت (u/D) و همچنین برای یک نمونه ماسه با دانه‌بندی و تراکم ثابت ارائه شده است. بنابراین بسط نتایج این پژوهش جهت مقاصد عملی نیازمند توجه به این محدودیت‌ها می‌باشد. به منظور دست‌یابی به یک نتایج کلی و بسط نتایج برای شرایط مختلف در مقاصد عملی، نیاز به انجام آزمون‌های متعدد همراه با شالوده‌های با ابعاد و شکل‌های مختلف، ژئوسل با هندسه و ابعاد متفاوت و همچنین ماسه‌های با تراکم و مشخصات دانه‌بندی متعدد می‌باشد. اگر چه به دلیل وجود فاکتورهای تاثیرگذار مختلف در اثر مقیاس، نتایج مربوط به آزمایش‌های کوچک مقیاس نمی‌تواند مستقیماً در مقاصد عملی به کار گرفته شود و جهت نیل به فاکتورهای کلیدی طراحی نیاز به انجام آزمون‌هایی با مقیاسی نزدیک به مقیاس واقعی و یا انجام آزمون‌های بزرگ مقیاس است، ولی انجام این نوع آزمون‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه بالایی است. به همین خاطر نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس می‌تواند اطلاعات مناسبی در خصوص عملکرد شالوده‌های با مقیاس واقعی را نشان دهد. علیرغم اینکه اثرات موضعی گسیختگی برشی در شالوده‌های با مقیاس کوچک محتمل می‌باشد ولی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که گسیختگی برشی کلی در هر دو شالوده کوچک و بزرگ مقیاس واقع بر خاک‌های مسلح شده، امکان‌پذیر است [۵۲] و بنابراین روند کلی حاصل شده می‌تواند به رفتار واقعی نزدیک باشد.

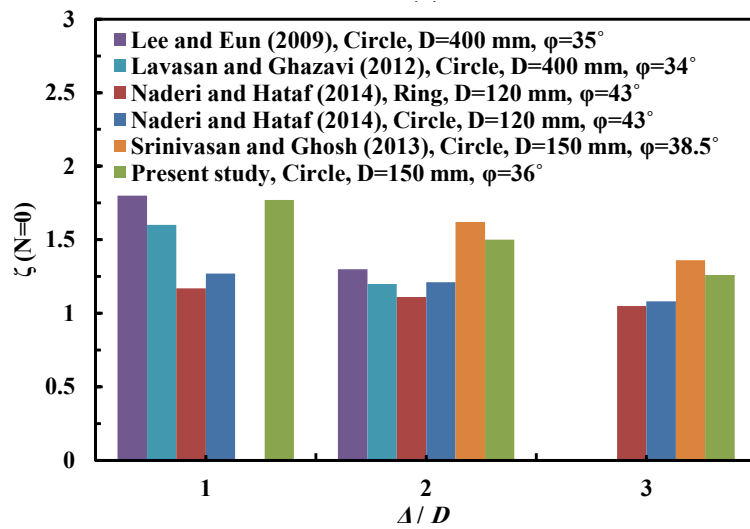
شالوده‌های متکی بر بستر با مسلح کننده سلولی می‌تواند به بهبود توان باربری شالوده‌های هم‌جوار کمک کند. همچنین میزان نشست نیز در شرایط بسترهای مسلح شده با مسلح کننده سلولی نسبت به مسلح کننده‌های دو بعدی به صورت مناسب‌تری بهبود یافته است (جدول ۴). جدول ۵ علاوه بر نمایش مقادیر I_f در مطالعه حاضر، مقایسه این نتیجه را با سایر مطالعات انجام شده بر روی بسترهای مسلح شده با مسلح کننده‌های دو بعدی نیز نشان می‌دهد. این نتایج بیان کننده ضریب I_f بزرگ‌تر برای مسلح کننده سلولی در مقایسه با مسلح کننده‌های دو بعدی است. در نتیجه می‌توان قضاوت نمود که میزان باربری شالوده‌های هم‌جوار واقع بر مسلح کننده سلولی در شرایطی که دو شالوده کاملاً در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند می‌تواند به بیش از ۳ برابر یک شالوده منفرد واقع بر بستر غیرمسلح برسد. نتایج مبین آن است که حتی در مقادیر نسبت‌های فاصله بزرگ میان دو شالوده ($D\Delta/3$)، نسبت باربری بستر مسلح شده با مسلح کننده سلولی می‌تواند بیش از ۲ برابر باربری شالوده‌های منفرد متکی بر بستر غیرمسلح باشد.

۷- دامنه کاربرد

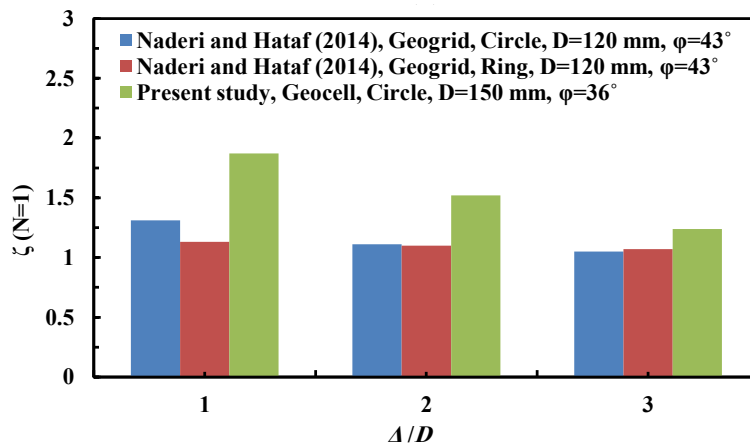
در این پژوهش به ارزیابی رفتار شالوده‌های دوقلوی دایروی در نسبت فواصل مختلف واقع بر ماسه‌های تسلیح شده با مسلح کننده سلولی پلیمری (ژئوسل) پرداخته شده است. دستاوردهای مستخرج از این تحقیق صرفاً برای یک



(a)



(b)



(c)

شکل ۸. مقایسه مقادیر BCR و ضریب همجواری (ζ) حاصل از تحقیقات مختلف برای دو شالوده دوار همجواری واقع بر خاک ماسه‌ای: (a) نسبت BCR، (b) ζ در حالت غیر مسلح، (c) ζ در حالت مسلح

Fig. 8. Comparison of BCR and interference factor (ζ) obtained from different researchers for two closely spaced round footings on sand; (a) BCR ratio, (b) ζ for unreinforced condition, (c) ζ for reinforced condition

جدول ۵. مقایسه ضریب I_f برای دو شالوده دایروی همجوار متکی بر بستر مسلح

Table 5. Comparison of I_f factor for two neighboring circular footings placed on reinforced bed

شکل شالوده	مرجع	N	Δ/D						شرح
			۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۴	
مربع	[۲۵] کومار و ساران	۰	۲/۰	۱/۸	۱/۳	۱/۲	-	-	Test, Geogrid, $\phi=37^\circ$, $D_f=60\%$, $B=100$ mm, SP
		۱	۱/۴ ^a	۲/۶ ^a	۲/۳ ^a	۲/۱ ^a	-	-	
	[۵۱] قضاوی و علیمردانی	۰	۱/۵	۱/۷	۱/۹	۱/۶	-	-	Num., Geogrid, $\phi=35^\circ$
		۱	۲/۱	۲/۴	۲/۷	۲/۲	-	-	
	[۲۶] علیمردانی و قضاوی	۰	۱/۳	۱/۶	۱/۲	-	-	-	Test, Geogrid, $\phi=34^\circ$, $D_f=40\%$, $B=400$ mm, SP
		۱	۱/۶	۱/۸	۱/۴	-	-	-	
	[۳۰] ساها روی و دب	۰	۱/۳	۱/۵۶	۱/۲۹	۱/۱۳	-	-	Test, Geogrid, $\phi=38^\circ$, $D_f=60\%$, $B=75$ mm, SP
		۱	۲/۰۹	۲/۲۷	۱/۹۶	۱/۷۹	-	-	
مستطیل	[۳۰] ساها روی و دب	۰	۱/۳۳	۱/۶۱	۱/۳۸	۱/۲۵	-	-	L/B=۱/۵, B=۱۱۲/۵ × ۷۵ mm
		۱	۲/۳۸	۲/۶۰	۲/۲۷	۲/۰۶	-	-	
		۰	۱/۳۷	۱/۶۵	۱/۴۰	۱/۱۹	-	-	L/B=۲, B=۱۵۰ × ۷۵ mm
		۱	۲/۵۲	۲/۸۰	۲/۴۳	۲/۲۴	-	-	
رینگ	[۲۷] نادری و هاتف	۰	۱/۱۷	-	۱/۱۱	-	۱/۰۵	۱/۰۳	Test/Num., Geogrid, $\phi=43^\circ$, $D_f=50\%$, $D=120$ mm, SW
		۱	۱/۹۰	-	۱/۸۴	-	۱/۸۰	۱/۷۲	
دایره	[۲۶] علیمردانی و قضاوی	۰	۱/۶	۱/۳	۱/۲	۱/۳	-	-	Test, Geogrid, $\phi=34^\circ$, $D_f=40\%$, $D=400$ mm, SP
		۱	۱/۹	-	۱/۴	-	-	-	
	[۲۷] نادری و هاتف	۰	۱/۲۷	-	۱/۲۱	-	۱/۰۸	۱/۰۲	Test/Num., Geogrid, $\phi=43^\circ$, $D_f=50\%$, $D=120$ mm, SW
		۱	۲/۴۱	-	۲/۰۳	-	۱/۹۴	۱/۸۴	
	[۲۸] علیمردانی و همکاران	۰	۱/۴۸	-	۱/۲۵	-	۱/۱	۱/۰۷	Physical/ Num., Geogrid, $\phi=35/8$, $D=400$ mm
		۱	۲/۰	-	۱/۴	-	۱/۳	۱/۲	
	مطالعه حاضر	۰	۱/۸۹	-	۱/۵۰	-	۱/۲۶	-	Test, Geocell, $\phi=36^\circ$, $D_f=60\%$, $D=150$ mm, SP
		۱	۳/۱۶	-	۲/۵۷	-	۲/۱۰	-	

^aمقادیر متناظر با ξ

۸- اثرات مقیاس

نسبت صورت پذیرد ولی این امکان در برخی موارد مقدور نمی‌باشد. به عنوان مثال کوچک نمودن دانه‌های خاکی در مقیاس نمودن مدل آزمون امکان‌پذیر نیست. بر طبق مطالعات صورت پذیرفته بر روی اثرات مقیاس، در صورتی که نسبت بعد شالوده به متوسط اندازه دانه‌های خاکی $D/D_{50} \geq 50-100$ باشد اندازه دانه‌های خاکی در اثرات مقیاس بی اثر و قابل صرف‌نظر خواهد بود. در این تحقیق این نسبت برابر با $D/D_{50} = 600$ می‌باشد و اندازه دانه‌های خاکی در مقیاس شونددگی بی تاثیر است. معمولاً جهت مقیاس نمودن مدل آزمون از ضریب مقیاس (N) استفاده می‌گردد که این ضریب حاصل نسبت عرض شالوده در واقعیت به عرض شالوده در مدل فیزیکی می‌باشد. از این ضریب می‌توان جهت تبدیل ضرایب طراحی برگرفته از مدل آزمون جهت مدل واقعی استفاده نمود. بر اساس تحقیقات لنگار [۵۳] جهت مقیاس نمودن مسلح کننده در مدل‌های آزمون می‌بایست مقاومت کششی مسلح کننده

جهت ارزیابی عملکرد شالوده‌ها و رسیدن به عوامل اصلی و موثر در طراحی، نیاز است تا آزمون‌ها با مقیاس واقعی انجام پذیرند. ولی انجام آزمایش‌ها با مقیاس منطبق بر آنچه در واقعیت است نیازمند صرف هزینه و وقت بسیار زیادی است. انجام آزمایش‌های با مقیاس کوچک‌تر می‌تواند داده‌های تقریبی مناسبی در مورد رفتار پی‌های با مقیاس واقعی نشان دهد. ذکر این نکته لازم است که به واسطه عوامل پیچیده موثر در خصوص اثرات مقیاس، نتایج برگرفته از آزمایش‌های با مقیاس کوچک‌تر نمی‌تواند با اطمینان و مستقیماً در مقاصد اجرایی به خدمت گرفته شود. در واقع هر چقدر درجه کوچک شونددگی مدل‌ها کمتر باشد می‌توان قضاوت نمود که رفتار آزمایش‌ها به واقعیت نزدیک‌تر است. همچنین در ساخت مدل فیزیکی تلاش می‌شود تا درصد کوچک شونددگی برای تمامی اجزای مدل به یک

افزایش دهد. این افزایش به نسبت فاصله بین دو شالوده تغییر می‌نماید.
۳- ترکیب اثر همجواری شالوده‌ها و مسلح کننده ژئوسل می‌تواند باعث افزایش ظرفیت باربری شالوده‌ها به میزان بیش از ۳۰٪ و بهبود نشست‌ها به میزان بیش از ۶۰٪ نسبت به حالت شالوده منفرد واقع بر بستر غیرمسلح شود.

۴- حداکثر باربری دو شالوده همجوار دایروی زمانی به وقوع می‌پیوندد که دو شالوده دقیقاً در کنار یکدیگر واقع شده باشند ($\Delta/D=1$) و با افزایش نسبت فاصله شالوده‌ها به بیش از سه برابر قطر آن‌ها ($\Delta/D>3$)، تاثیر همجواری به میزان چشمگیری کاهش یافته و در مباحث طراحی قابل صرف نظر کردن است و هر کدام از شالوده‌ها رفتاری مستقل خواهند داشت. این مساله در هر دو شرایط بستر مسلح و غیرمسلح صادق می‌باشد.

۵- در شرایطی که بستر خاک مسلح است با افزایش میزان نشست شالوده‌ها، نسبت باربری شالوده‌ها نیز متناظر با آن افزایش می‌یابد و این مساله حاکی از اثر مثبت مسلح کننده در مقادیر نشست‌های بالا و به تاخیر انداختن پلاستیک شدگی خاک زیر شالوده می‌باشد. در واقع مسلح کننده باعث می‌گردد خاک زیر شالوده به رفتار خطی خود حتی در نشست‌های بالا نیز ادامه دهد و این نتیجه نشان دهنده پتانسیل و قابلیت‌های بالاتر مسلح کننده سلولی در مقادیر نشست‌های بالاتر است.

۱۰- فهرست علائم

b	(mm)	عرض لایه ژئوسل
B	(mm)	عرض شالوده
D	(mm)	قطر شالوده
L	(mm)	طول شالوده
C _c	(-)	ضریب انحنا
C _u	(-)	ضریب یکنواختی
d	(mm)	قطر چشمه ژئوسل
D ₁₀	(mm)	اندازه موثر دانه‌های خاک
D ₅₀	(mm)	متوسط اندازه دانه‌های خاک
D _r	(%)	تراکم نسبی
e _{max}	(-)	حداکثر نسبت تخلخل

در مدل واقعی N^2 برابر مقاومت کششی مسلح کننده در مدل آزمون باشد. اگر چه بر اساس مطالعات انجام شده توسط سبیریش و همکاران [۵۴] آن چیزی که در راندمان و تداوم کارایی ژئوسل مهم است سختی گره‌های سلول‌ها می‌باشد. با فرض آن که قطر یک شالوده دایروی در واقعیت mm ۵۰ باشد با توجه به ابعاد شالوده مورد استفاده در مدل‌سازی، ضریب مقیاس برابر با $N=5$ و در نتیجه مقاومت کششی مسلح کننده مورد نیاز برای شالوده واقعی برابر با $233 \approx 21 \times 3/3^2$ kN/m است اگر چه وجود چنین ژئوسلی با این مقاومت در عمل موجود نیست ولی می‌توان با استفاده از مواد دیگری نظیر بامبو یا غیره که دارای سختی بیشتر، مقاومتی به مراتب بالاتر و سطوح زبرتر از مسلح کننده‌های پلیمری دارند [۴۶] ژئوسلی با ابعاد چشمه‌های کوچک‌تر، ارتفاع بزرگ‌تر و هندسه سلولی مناسب‌تر ایجاد نمود که راندمانی نزدیک به آنچه در عمل مورد نیاز است تامین نماید. همچنین جهت معادل‌سازی ضخامت شالوده بتنی در عمل و شالوده موجود در مدل آزمون می‌بایست با استفاده از ضریب N و با تعیین مدول الاستیسیته و صلیبت خمشی تفلون و بتن (EI)، سختی این دو ماده را معادل نمود. در پایان توصیه می‌شود جهت نیل به رفتار واقعی خاک مسلح شده با ژئوسل تحت بارگذاری شالوده‌های همجوار، نیاز به آزمون‌های با مقیاس واقعی و یا آزمون‌هایی نظیر آزمایش ساترئیفیوژ می‌باشد تا بتوان اثرات مقیاس را در نتایج به حداقل لازم رساند.

۹- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر رفتار دو شالوده متقارن دایروی همجوار واقع بر بستر ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با مسلح کننده سلولی تحت بارگذاری استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با به خدمت گرفتن یک ژئوسل با هندسه بهینه که در عمق مدفون بهینه واقع شده است، منحنی بار-تغییر مکان شالوده‌های همجوار تحت بارگذاری استخراج گردید. جهت این پژوهش تعداد ۱۱ آزمون بر روی بستر مسلح و غیرمسلح انجام شد و تغییر در فواصل بین شالوده‌ها به عنوان متغیر اصلی آزمون‌ها در نظر گرفته شد. خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل قابل بیان است:

۱- میزان باربری دو شالوده همجوار واقع بر بسترهای مسلح و غیرمسلح ناشی از وجود اثر همجواری بین شالوده‌ها بیشتر از همان شالوده در شرایط منفرد واقع بر بستر مشابه می‌باشد.

۲- وجود مسلح کننده ژئوسل در زیر شالوده‌های دو قلو، می‌تواند میزان باربری آن‌ها را در مقایسه با حالت بسترهای غیرمسلح حتی تا مقدار ۸۰٪

منابع

- [1] A. Hegde, Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: A state-of-the-art review, *Construction and Building Materials*, 154 (2017) 658-674.
- [2] D.I. Bush, C.G. Jenner, R.H. Bassett, The design and construction of geocell foundation mattresses supporting embankments over soft grounds, *Geotextiles and Geomembranes*, 9(1) (1990) 83-98.
- [3] J.W. Cowland, S.C.K. Wong, Performance of a road embankment on soft clay supported on a Geocell mattress foundation, *Geotextiles and Geomembranes*, 12(8) (1993) 687-705.
- [4] I. Al-Qadi, J. Hughes, Field evaluation of geocell use in flexible pavements, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1709) (2000) 26-35.
- [5] J. Han, S.K. Pokharel, X. Yang, C. Manandhar, D. Leshchinsky, I. Halahmi, R.L. Parsons, Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11) (2011) 1525-1534.
- [6] J. Guo, J. Han, S.D. Schrock, R.L. Parsons, Field evaluation of vegetation growth in geocell-reinforced unpaved shoulders, *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5) (2015) 403-411.
- [7] P. Fazeli Dehkordi, M. Ghazavi, N. Ganjian, Evaluation behavior of circular footings located on sand bed reinforced with geocell, *Amir Kabir Journal of Civil Engineering*, 53(5) (2021) doi: 10.22060/CEEJ.2020.17159.6479.
- [8] P. Fazeli Dehkordi, U.F.A. Karim, Behaviour of circular footings confined by rigid base and geocell reinforcement, *Arabian Journal of Geosciences*, 13(20) (2020) 1100.
- [9] P. Fazeli Dehkordi, M. Ghazavi, U.F.A. Karim, Bearing capacity-relative density behavior of circular footings resting on geocell-reinforced sand, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2021) <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1884901>.
- [10] J.G. Stuart, Interference between foundations, with special Reference to surface footings in sand,

e_{min}	(-)، حداقل نسبت تخلخل
G_s	(-)، چگالی ویژه دانه‌های خاک
h	(mm)، ارتفاع ژئوسل
N	(mm)، تعداد ژئوسل
q_u	(kPa)، ظرفیت باربری نهایی خاک
S	(mm)، نشست شالوده
u	(mm)، عمق مدفون ژئوسل
φ	(درجه)، زاویه اصطکاک داخلی خاک
Δ	(mm)، فاصله مرکز به مرکز شالوده‌ها
γ_d	(kN/m^3)، وزن واحد حجم خاک خشک
ζ	(-)، ضریب همجواری
I_f	(-)، ضریب بهبود ظرفیت باربری

علائم یونانی

مخفف‌ها

BCR	نسبت ظرفیت باربری در یک نشست مشخص
LVDT	تغییر مکان سنج خطی
PRS	(%)، درصد کاهش نشست
SP	ماسه بد دانه‌بندی شده
HDPE	پلی اتیلن با چگالی بالا

زیر نویس‌ها

Confinement effect	اثر محصور شدگی
Data logger	دستگاه ثبت اطلاعات
Lateral dispersion effect	اثر توزیع بار
Load cell	سلول اندازه‌گیری بار
Membrane effect	اثر خمشی
Pouring method	روش بارانی
Scaling Laws	قوانین مقیاس
Tensile testing machine	دستگاه تعیین مقاومت کششی

- (1994) 285-301.
- [21] A.M. Eltohamy, A.F. Zidan, Performance of interfering strip footings resting on reinforced sand under uniform and non-uniform load-experimental and numerical study, *Journal of American Science*, 9(1) (2013) 421-430.
- [22] R. Noorzad, E. Manavirad, Bearing capacity of two close strip footings on soft clay reinforced with geotextile, *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2) (2014) 623-639.
- [23] A.G. Ekbote, L. Nainegali, Interference of two closely spaced footings embedded in unreinforced and reinforced soil medium: a finite element approach using ABAQUS, *Arabian Journal of Geosciences*, 12(22) (2019) 683.
- [24] N. Biswas, P. Ghosh, Interaction of adjacent strip footings on reinforced soil using upper-bound limit analysis, *Geosynthetics International*, 25(6) (2018) 599-611.
- [25] A. Kumar, S. Saran, Closely spaced footings on geogrid-reinforced sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 129(7) (2003) 660-664.
- [26] A.A. Lavasan, M. Ghazavi, Behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand, *Soils and Foundations*, 52(1) (2012) 160-167.
- [27] E. Naderi, N. Hataf, Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(3) (2014) 191-200.
- [28] A.A. Lavasan, M. Ghazavi, T. Schanz, Analysis of interfering circular footings on reinforced soil by physical and numerical approaches considering strain-dependent stiffness, *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 17(11) (2017) 04017096.
- [29] S. Saha Roy, K. Deb, Closely spaced rectangular footings on sand over soft clay with geogrid at the interface, *Geosynthetics International*, 25(4) (2018) 412-426.
- [30] S. Saha Roy, K. Deb, Effect of aspect ratio of footing on behavior of two closely-spaced footings on geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4) (2020) 443-453.
- Géotechnique*, 12(1) (1962) 15-22.
- [11] V. Srinivasan, P. Ghosh, Experimental investigation on interaction problem of two nearby circular footings on layered cohesionless soil, *Geomechanics and Geoengineering*, 8(2) (2013) 97-106.
- [12] S. Saran, V.C. Agarwal, Interference of surface footings in sand, *Indian Geotechnical Journal*, 4(2) (1974) 129-139.
- [13] P. Ghosh, P.K. Basudhar, V. Srinivasan, K. Kunal, Experimental studies on interference of two angular footings resting on surface of two-layer cohesionless soil deposit, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(4) (2015) 422-433.
- [14] P. Fazeli Dehkordi, U.F.A. Karim, M. Ghazavi, N. Ganjian, Stochastic analysis of the capacity of two parallel footings on a thin sand layer, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 172(4) (2019) 355-364.
- [15] A.A. Lavasan, M. Ghazavi, A.V. Blumenthal, T. Schanz, Bearing capacity of interfering strip footings, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 144(3) (2018) 04018003.
- [16] S. Saha Roy, K. Deb, Interference effect of closely spaced footings resting on granular fill over soft clay, *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 19(1) (2019) 04018181.
- [17] M. Ghazavi, P. Fazeli Dehkordi, Interference influence on behavior of shallow footings constructed on soils, past studies to future forecast: A state-of-the-art review, *Transportation Geotechnics*, 27 (2021) 100502.
- [18] K.H. Khing, B.M. Das, S.C. Yen, V.K. Puri, E.E. Cook, Interference effect of two closely-spaced shallow strip foundations on geogrid-reinforced sand, *Geotechnical and Geological Engineering*, 10(4) (1992) 257-271.
- [19] P. Ghosh, Interference effect of two nearby strip footings on reinforced sand, *Contemporary Engineering Sciences*, 2(12) (2009) 577-592.
- [20] M. Al-Ashou, R. Sulaiman, J. Mandal, Effect of number of reinforcing layers on the interference between footings on reinforced sand, *Indian Geotechnical Journal*, 24(3)

- [41] P.D. Coduto, M.R. Yeung, A.W. Kitch, Geotechnical engineering: principles and practices, New Jersey: PHI publication, (1999).
- [42] K. Rajagopal, N.R. Krishnaswamy, G. Madhavi Latha, Behaviour of sand confined with single and multiple geocells, Geotextiles and Geomembranes, 17(3) (1999) 171-184.
- [43] E. Buckingham, On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations, Physical review, 4(4) (1914) 345-376.
- [44] A. Hegde, T.G. Sitharam, Experimental and numerical studies on protection of buried pipelines and underground utilities using geocells, Geotextiles and Geomembranes, 43(5) (2015) 372-381.
- [45] A. Hegde, T.G. Sitharam, Experiment and 3D-numerical studies on soft clay bed reinforced with different types of cellular confinement systems, Transportation Geotechnics, 10 (2017) 73-84.
- [46] A. Hegde, T.G. Sitharam, Use of bamboo in soft-ground engineering and its performance comparison with geosynthetics: experimental studies, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 27(9) (2015) 04014256.
- [47] S.K. Dash, Influence of relative density of soil on performance of geocell-reinforced sand foundations, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 22(5) (2010) 533-538.
- [48] S.K. Dash, N.R. Krishnaswamy, K. Rajagopal, Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, 19(4) (2001) 235-256.
- [49] S. Amar, F. Canepa, Y. Frank, Experimental study of the settlement of shallow foundations. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE, 40(2) (1994) 1602-1610.
- [50] A. Hegde, T.G. Sitharam, 3-Dimensional numerical modelling of geocell reinforced sand beds, Geotextiles and Geomembranes, 43(2) (2015) 171-181.
- [51] M. Ghazavi, A.A. Lavasan, Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics, Geotextiles and Geomembranes, 26(5) [31] B. Paikaray, S.K. Das, B.G. Mohapatra, Effect of reinforcement layout on interference effect of square footings on reinforced crusher dust, International Journal of Geotechnical Engineering, (2020) <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1712531>.
- [32] A. Gupta, G.K. Lakshman, T. Sitharam, Interference of square footings on geocell reinforced clay bed: experimental and numerical studies. Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18), Budapest, Hungary, ICGRE 142 (2018) 1-8.
- [33] P. Fazeli Dehkordi, M. Ghazavi, N. Ganjian, U.F.A. Karim, Effect of geocell-reinforced sand base on bearing capacity of twin circular footings, Geosynthetics International, 26(3) (2019) 224-236.
- [34] ASTM D2487, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2011).
- [35] ASTM D7181, Method for consolidated drained triaxial compression test for soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2011).
- [36] ASTM D4253, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils a vibratory table, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2016).
- [37] ASTM D4254, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, (2016).
- [38] ASTM D4885, Standard test method for determining performance strength of geomembranes by wide strip tensile method, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA., (2011).
- [39] K. Ueno, K. Miura, Y. Maeda, Prediction of ultimate bearing capacity of surface footings with regard to size effects, Soils and Foundations, 38(3) (1998) 165-178.
- [40] Itasca, Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC3D 5.00), Itasca Consulting Group Inc, Minneapolis, USA., (2015).

- models, John Wiley & Sons, New York, NY (1951). (2008) 404-415.
- [54] S. Sireesh, T.G. Sitharam, S.K. Dash, Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2) (2009) 89-98.
- [52] M.T. Adams, J.G. Collin, Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(1) (1997) 66-72.
- [53] J.L. Langhaar, Dimensional analysis and theory of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Fazeli Dehkordi, Assessment Behavior of Cojointed Footings System Placed on Sands Encased by Geocell Reinforcement: Experimental Study, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 1057-1076.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19194.7102



