

The Impact of Using Geogrid Capsules on The Bearing Capacity of Strip Foundations in Sandy Soils

Seyyed Amir Hossein Razavi Mehr¹, Vahid Rostami*¹

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

ABSTRACT: Soil is a material that exhibits good compressive strength but is weak under tension. To overcome tensile weakness and enhance shear strength, various soil improvement techniques are employed. Soil reinforcement is a common technique that uses natural or synthetic materials for this purpose. In recent years, materials like geosynthetics have seen significant development in soil reinforcement. Among the most common synthetic reinforcements are geogrids, which mobilize the friction at the interface between soil and reinforcement materials, thereby increasing both the tensile and shear strength of the soil. This study examines the effect of geogrid capsules on the bearing capacity of strip foundations on sandy soils. The force-settlement variations were modeled and analyzed using the PLAXIS 2D finite element software to conduct sensitivity analysis for the research variables. In this study, after validating the numerical model, the impact of parameters such as capsule length, thickness, number of layers, distance from the foundation, and spacing between capsules on the ultimate bearing capacity of the strip foundation was investigated. The results of these analyses were presented in the form of dimensionless graphs, from which the optimal depth of placement, thickness, and number of encapsulated reinforcement layers were determined. The analysis results indicate that the use of geogrid capsules significantly improves the soil reinforcement outcomes compared to geogrid sheets. Additionally, increasing the number of capsule layers considerably enhances the bearing capacity of the strip foundation, with the highest bearing capacity observed at a depth ratio of 0.1. Ultimately, increasing the length and number of capsule layers results in higher bearing capacity and reduced settlement, due to the prevention of failure surface development beneath the capsule. Consequently, the optimal length and thickness of the capsule were determined.

Review History:

Received: May, 24, 2023

Revised: Aug. 06, 2024

Accepted: Dec. 20, 2024

Available Online: Feb. 06, 2025

Keywords:

Geogrid

Settlement

Reinforced Soil

Geogrid Capsules

Bearing Capacity of Strip Foundation

1- Introduction

In today's diverse construction site conditions, the method and performance of soil reinforcement are crucial. Soil inherently has good compressive and shear strength but is weak under tension. Various efforts have been made to overcome this tensile weakness, notably using geosynthetics in geotechnical engineering to improve soil-bearing capacity. Researchers have conducted small- and large-scale experiments and numerical studies to evaluate the effectiveness of reinforced soil foundations and develop rational design methods. Notably, studies have focused on the impact of geogrid reinforcement on bearing capacity and settlement behavior. This study explores the optimal dimensions, layer count, and placement depth of geogrid capsules, highlighting their economic advantages over other geosynthetic reinforcements like geocells, while maintaining similar applicability.

2- Numerical modeling

The finite element software Plaxis 2D was used to simulate the effect of the geogrid capsule on the ultimate bearing capacity of the soil. For validation, the numerical models were compared with the results obtained from an innovative loading device in the Soil Mechanics Laboratory of Islamic Azad University, Hamedan Branch. The geogrid capsule was modeled by placing two layers of geogrid side by side, filled with strong sand. The model dimensions were determined to be 10 m high and 22 m wide, which included loose and strong sandy soils. A 2 m wide strip foundation was placed on the surface and centered on the loose sandy soil. To investigate the factors affecting the bearing capacity of strip foundations, 1 analysis in the unreinforced state and 30 analyses in the reinforced state were planned and carried out. The number of layers and length of the reinforcements, the distance of the reinforcements from each other and from the bottom of the foundation, and the thickness of the capsule were among the variables that were evaluated to investigate

*Corresponding author's email: Rostami@iauh.ac.ir



Fig. 1. The capsule used in the Experimental modeling

the effect on the bearing capacity of the strip foundation.

3- Experimental modeling

An innovative small-scale loading device was employed, using silica sand and Rockshield geogrid. Tests were conducted under dry conditions to analyze the effects of parameters. The test tank was filled to a height of 30 cm using the sand settling method to achieve the desired density. A geogrid capsule, filled with strong sand, was placed and buried. After testing, the soil for each test was drained and refilled. A metal strip footing was then secured to the surface without disturbing it. During load application, a hydraulic jack applied a constant displacement with a constant soil-specific gravity and a loading rate of 1 mm/min. Settlement was the ultimate loading criterion, which continued up to 30% of the foundation width (15 mm) and the bearing capacity was considered at this final point.

4- Verification of results

The results of the numerical and experimental models were verified and found to be similar, with only minor differences, indicating that the results are correct.

5- Result and Discussion

The increase in bearing capacity due to soil reinforcement is expressed as a dimensionless parameter BCR (bearing capacity ratio) which is used to compare the bearing capacity in reinforced and unreinforced conditions with each other.

$$BCR_1 = \frac{qr_1}{q} \quad (1)$$

Table 1. Sand and Gravel Characteristics

Soil type	Parameter	Latin symbol	Unit	Value
Silica Sand (SP)	Modulus of elasticity of soil	E_s	KN/m ²	15×10^3
	Internal friction angle	ϕ	degrees (°)	34
	Cohesion	C	KN/m ²	1
	Poisson's ratio	ν	-	0.3
	Soil specific gravity	γ	KN/m ³	19.5
Gravel (GP)	Modulus of elasticity of soil	E_s	KN/m ²	5×10^4
	Internal friction angle	ϕ	degrees (°)	38
	Cohesion	C	KN/m ²	1
	Poisson's ratio	ν	-	0.35
	Soil specific gravity	γ	KN/m ³	20

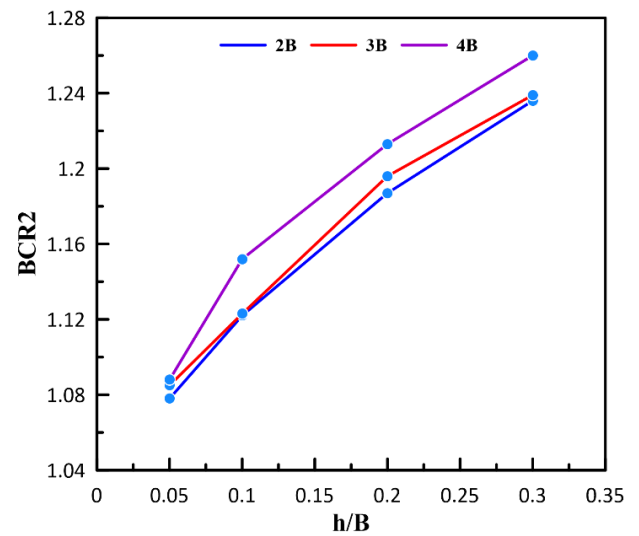


Fig. 2. Diagram of changes in BCR2 focusing on the effect of capsule height with $h=0.05B$, $h=0.1B$, $h=0.2B$, $h=0.3B$.

$$BCR_2 = \frac{qr_2}{q} \quad (2)$$

In the following, in order to analyze the sensitivity of the effect of parameters such as the distance of the reinforcement from the level below the foundation floor, length, number of layers of reinforcement, thickness of the capsule layer, bearing capacity ratio (BCR) and bearing capacity in different cases are plotted and compared. For this reason, the parameter whose amount and manner of effect is to be determined in the analyses is considered as a variable parameter and the other parameters are considered fixed. An evaluation of the effect of reinforcement length on the bearing capacity of a strip foundation, where both length and height were varied at a constant distance from the footing, showed a 26% increase compared to the unreinforced condition. Similarly, increasing the capsule height to 0.3B resulted in a 26% improvement in

bearing capacity. The optimal placement, with three capsule layers near the footing, resulted in a 68% increase in bearing capacity compared to the unreinforced condition.

6- Conclusions

Results from 2D PLAXIS finite element modeling of a strip footing on sandy soil using geogrid encapsulation indicate a significant improvement in bearing capacity due to the structure of the capsules. Key findings include:

1. Optimal benefits are achieved when the top of the capsule is 0.1B below the foundation. Greater depths can lead to lateral spreading of the soil and reduced performance.
2. Increasing the capsule width to 4B effectively prevents the development of the failure surface and increases load distribution.
3. Capsule height increases stiffness, with optimal performance at a height of 0.3B, preventing local buckling.
4. Adding more capsule layers improves performance by preventing the development of the failure surface, with best results at 1 to 3 layers at a distance of 0.1B and a height of 0.3 B.
5. Bearing capacity increases continuously with geogrid reinforcement, with the greatest improvement seen in three-layer configurations.

References

- [1] M. Salehi, & M. Hosseini, Evaluation of the bearing behavior of strip foundations on stratified soil reinforced with geogrid, *Omran Sharif J. Civil Eng*, 2-31(4/1), 1394, 83-88. (in Persian)
- [2] M. Rabeti Moghadam, J. Monfared, & M. Parvizi, Numerical investigation of the effect of geogrid on the ultimate bearing capacity of strip foundation under eccentric load and determining the optimal arrangement of reinforcing layers, *Amirkabir J. Civil Eng*, 52(12), 1399, 3109-3124. (in Persian)
- [3] A. Hooshyar, & V. Rostami, Granular soil bearing capacity improvement using waste plastic materials, *Amirkabir J. Civil Eng*, 50(4), 1397, 755-764. (in Persian)
- [4] A. Ouria, S. Emami, & S. Karamzadegan, Laboratory investigation of the effect of the cement treatment of the interface and the thicknesses of reinforcement on its pull-out capacity, *Amirkabir J. Civil Eng*, 52(11), 1399, 1-15. (in Persian)
- [5] M. Esmaeili, M. Rozbini, & S. Sorani, Laboratory investigation of the effect of geocell on the bearing capacity of railway fines, *Omran Sharif J. Civil Eng*, 2-35(2/1), 1398, 51-63. (in Persian)
- [6] M. Abbasian, & A. Lakirouhani, Investigation of soil-geogrid interface in direct shear test, with emphasis on the size of apertures of geogrid and different compaction degrees of soil, *Amirkabir J. Civil Eng*, 50(5), 1397, 949-960. (in Persian)
- [7] J. Sadeghi, A. R. Tolou Kian, H. Ghiasinejad, M. Fallah Moqaddam, & S. Motevalli, Effectiveness of geogrid reinforcement in improvement of mechanical behavior of sand-contaminated ballast, *Geotextiles and Geomembranes*, 48, 2020, 768-779.
- [8] X. Chen, J. Zhang, & Z. Li, Shear behavior of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale triaxial tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 42, 2014, 312-328.
- [9] S. K. Shukla, & M. N. A. Raja, Ultimate bearing capacity of strip footing resting on soil bed strengthened by wraparound geosynthetic reinforcement technique, *Geotextiles and Geomembranes*, 48, 2020, 867-874.



تأثیر استفاده از کپسول ژئوگریدی بر ظرفیت باربری پی‌های نواری در خاک‌های ماسه‌ای

سید امیرحسین رضوی مهر^{۱b}، وحید رستمی^{۱b*}

گروه عمران، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

کلمات کلیدی:

کپسول ژئوگرید
ظرفیت باربری پی نواری
نشست
ژئوگرید
خاک مسلح

خلاصه: خاک مصالحی است که در مقابل فشار مقاومت خوبی دارد اما در مقابل کشش ضعیف است. به منظور غلبه بر ضعف کششی و تقویت مقاومت برشی خاک از روش‌های مختلفی برای بهسازی خاک استفاده می‌شود. تکنیک خاک مسلح به عنوان یک روش بهسازی خاک از مصالح طبیعی یا مصنوعی به همین منظور استفاده می‌کنند. در سال‌های اخیر مصالحی همچون ژئوسنتتیک‌ها در مسلح سازی خاک توسعه قابل توجهی پیدا کرده‌اند یکی از متداول‌ترین نوع مسلح کننده‌های مصنوعی ژئوگریدها می‌باشند که با بسیج اصطکاک موجود در سطح تماس خاک و مصالح مسلح کننده موجب افزایش مقاومت کششی و همچنین مقاومت برشی خاک می‌شود. در مطالعه حاضر اثر کپسول ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است به همین منظور تغییرات نیرو-نشست، با استفاده از نرم افزار امان محدود 2D PLAXIS مدلسازی و آنالیز حساسیت برای متغیرهای تحقیق صورت گرفته است. در مطالعه حاضر پس از صحت سنجی مدل عددی تأثیر پارامترهایی نظیر طول، ضخامت کپسول، تعداد لایه‌ها و فاصله کپسول‌ها از زیر پی و فاصله بین کپسول‌ها بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری مطالعه شده است و نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در قالب نمودارهای بدون بعد ترسیم و بر اساس آن عمق بهینه قرارگیری، ضخامت بهینه و تعداد لایه‌های مسلح کننده کپسولی تعیین گردیده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بکارگیری کپسول ژئوگریدی نسبت به صفحات ژئوگرید تأثیر قابل توجهی در نتایج بهسازی خاک ارائه می‌کند. همچنین با افزودن تعداد لایه‌های کپسول ظرفیت باربری پی نواری افزایش قابل توجهی می‌یابد که بیشترین ظرفیت باربری پی ناشی از قرار دادن کپسول‌ها در نسبت عمق ۰/۱ حاصل می‌شود و در نهایت با افزایش طول و تعداد لایه‌های کپسول ظرفیت باربری افزایش و نشست کاهش می‌یابد که ناشی از جلوگیری از توسعه سطح گسیختگی خاک زیر کپسول می‌باشد در نتیجه مقادیر طول و ضخامت بهینه کپسول استخراج گردیده است.

۱- مقدمه

سعی در برآورد کارایی شالوده خاک مسلح و ایجاد روش‌های منطقی جهت طراحی را داشته‌اند. همچنین برخی از محققین مطالعه‌های عددی را در این خصوص انجام داده‌اند و پارامترهای موثر بر رفتار مسلح کننده‌ها، خاک مسلح و افزایش ظرفیت باربری پی‌ها را مورد بررسی قرار قرار داده‌اند.

حسینی و صالحی (۱۳۹۴) با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود FLAC 2D به بررسی عددی ارزیابی رفتار باربری پی‌های نواری بر روی خاک لایه‌ای مسلح با ژئوگرید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش عمق لایه خاک متراکم تأثیری در افزایش ظرفیت باربری نهایی پی نواری نخواهد داشت همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اثر مسلح سازی خاک لایه‌ای با افزایش عمق بهسازی کاهش

امروزه با توجه به تنوع شرایط زمین‌های محل احداث ساختمان‌ها و پروژه‌های عمرانی و تأثیر نحوه‌ی مسلح سازی و عملکرد مسلح کننده‌ها در شرایط متفاوت ساختگاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آنچه مسلم است خاک مصالحی است که در مقابل فشار و برش مقاومت خوبی دارد اما در مقابل کشش ضعیف است. تلاش‌های متعددی به منظور غلبه بر ضعف کششی خاک انجام گرفته است. امروزه در مهندسی ژئوتکنیک از مصالح ژئوسینتتیک جهت بهسازی خاک از جمله افزایش ظرفیت باربری خاک استفاده می‌شود. محققین در این زمینه با انجام آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس

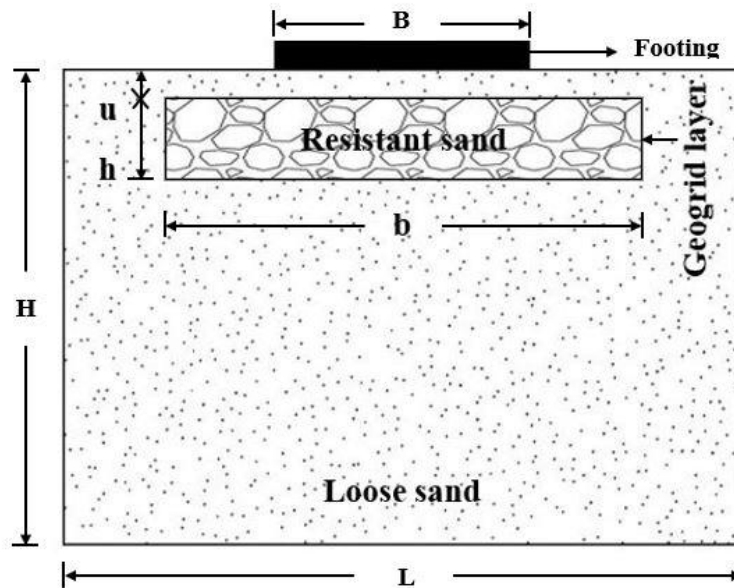
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Rostami@iauh.ac.ir



می‌یابد[۱]. حسینی و ابریشمی (۱۳۸۹) به بررسی آزمایشگاهی اثر سرعت بارگذاری بر ظرفیت باربری شالوده‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح به ژئوگرید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اندرکنش خاک و ژئوگرید منجر به پیچیدگی رفتار مجموعه و بروز رفتار متفاوت با خاک غیرمسلح می‌شود به همین دلیل آزمایش‌های صورت گرفته به منظور بررسی اثر نرخ بارگذاری بر رفتار مدل پی نواری واقع بر خاک مسلح به ژئوگرید نشانگر رفتارهایی کاملاً متفاوت با خاک غیرمسلح بود[۲]. رابطی مقدم و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از نرم افزار المان محدود Plaxis 2D به بررسی عددی تاثیر ژئوگرید بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری تحت بار قائم با خروج از مرکزیت و تعیین چیدمان بهینه لایه‌های مسلح کننده واقع بر خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که با افزودن لایه‌های ژئوگرید ظرفیت باربری پی تحت بار خارج از مرکز افزایش قابل توجهی یافت و میزان اثرگذاری تابع چیدمان لایه‌ها و میزان خروج از مرکزیت بار بوده است[۳]. هوشیار و رستمی (۱۳۹۷) به بررسی آزمایشگاهی استفاده از ضایعات پلاستیکی یکبار مصرف در بهبود ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای با دستگاه CBR پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در حالت بدون مسلح کننده با افزایش نفوذ سنبه ظرفیت باربری نمونه افزایش می‌یابد و با قراردادن قطعات ضایعات پلاستیکی در خاک ماسه‌ای ظرفیت باربری افزایش قابل توجهی خواهد یافت[۴]. تبری و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی آزمایشگاهی اثر فرکانس بارگذاری بر نشست و ظرفیت باربری خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید با یک سیستم آزمایشگاهی با قابلیت انجام آزمایش‌های بارگذاری صفحه استاتیکی و تناوبی پرداختند. آن‌ها در نتایج خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش فرکانس بارگذاری و نزدیک شدن مقدار آن به فرکانس طبیعی سیستم نشست تناوبی افزایش می‌یابد[۵]. اوریا و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی آزمایشگاهی اثر تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و ژئوتکستایل و ضخامت آن در مقاومت بیرون کشیدگی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تثبیت سیمانی محل فصل مشترک مسلح کننده و خاک بدون در نظر گرفتن افزایش ضخامت مسلح کننده باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی آن می‌شود[۶]. اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر ژئوسل در ظرفیت باربری خاکریز های راه آهن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش ظرفیت باربری خاکریز و کاهش نشست متناسب با افزایش

تعداد لایه ژئوسل است[۷]. روحانی و عباسیان (۱۳۹۷) به بررسی رفتار فصل مشترک خاک - ژئوگرید در آزمایش برش مستقیم با تاکید بر اندازه ابعاد چشمه‌های ژئوگرید و تراکم نسبی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش تراکم خاک کاهش مقاومت در فصل مشترک خاک - ژئوگرید بیشتر می‌شود و همچنین با کاهش فواصل نوارهای عرضی ژئوگرید مقاومت برشی فصل مشترک خاک - ژئوگرید بیشتر کاهش خواهد یافت[۸]. افشارفریا و رستمی (۱۳۹۶) به بررسی ظرفیت باربری پی واقع بر بالای دیوار حائل مسلح شده با ژئوگرید در خاکریز خشک و اشباع پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در هر دو شرایط خاکریز اشباع و خشک استفاده از مسلح‌کننده‌ها موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری پی نواری نسبت به شرایط خاک غیر مسلح می‌شود[۹]. صادقی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثر بخشی تقویت ژئوگرید در بهبود رفتار مکانیکی بالاست ماسه دار پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تسلیح ژئوگرید به طور قابل توجهی مقاومت برشی و سختی عمودی بالاست ماسه دار را بهبود می‌بخشد[۱۰]. میتال و گیل (۲۰۱۸) به بررسی کاربرد پایدار ضایعات چپ‌های تیر و ژئوگرید برای بهبود بار حمل ظرفیت خاک‌های دانه‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن ضایعات تیر به طور قابل توجهی ظرفیت باربری ماسه را افزایش می‌دهد[۱۱]. چن و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی رفتار برشی خاک درشت دانه مسلح شده با ژئوگرید بر اساس آزمایش‌های سه محوری در مقیاس بزرگ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت خاک مسلح به ژئوگرید با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید افزایش می‌یابد و تعداد لایه‌های ژئوگرید بر مقاومت تحرک خاک نوع سطح لغزش تأثیر می‌گذارد[۱۲]. راجا و شوکلا (۲۰۲۰) به بررسی ظرفیت باربری نهایی پی‌های نواری مستقر بر بستر خاک مسلح شده با روش تسلیح ژئوسینتیکی دورپیچ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری نهایی خاک که بر روی بستر تقویت شده قرار دارد با تکنیک تسلیح کننده ژئوسنتتیک دورپیچ افزایش می‌یابد[۱۳].

با توجه به مطالعه‌های صورت گرفته نتیجه واحدی که همه محققین تا کنون به آن دست یافته‌اند افزایش چشمگیر ظرفیت باربری خاک با قرار دادن مسلح کننده‌های ژئوسنتتیک در عمق مشخص از زیر پی است. اما تاکنون در مورد افزایش ظرفیت باربری پی‌های سطحی با کپسول ژئوگرید پژوهشی صورت نگرفته است. لذا



شکل ۱. تصویر شماتیک مدلسازی با تک لایه کپسول و پارامترهای مربوط

Fig. 1. Schematic image of single layer capsule modeling and related parameters

گره‌ای و مش بندی از نوع ریز انتخاب شده است. همچنین رفتار خاک از مدل و معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده شده است. برای تعریف مصالح استفاده شده جهت مدلسازی مسلح‌کننده، کپسول ژئوگرید از المان Geogrid با رفتار خطی در نرم افزار Plaxis 2D استفاده شده است. با توجه به اینکه از المان‌های ۱۵ گره‌ای برای مدلسازی خاک استفاده شد، نرم افزار المان‌های ژئوگرید را بطور خودکار به صورت ۵ گرهی فرض می‌کند. همچنین به منظور در نظر گرفتن اثر سطح مشترک بین المان‌های ژئوگرید و خاک از المان Interface استفاده شد. همچنین مرزهای مدل جهت مدلسازی به صورت مرزهای ثابت در جهت‌های x,y در کف و در راستای قائم طرفین مدل تغییر شکل قائم آزاد می‌باشد. همانطور که در «شکل ۱» نشان داده شده است پارامترهای مدلسازی بدین صورت است که عمق کل لایه خاک ماسه با H، عرض پی با B، ارتفاع کپسول با h، فاصله کپسول از کف پی با u، عرض کپسول با b و تعداد لایه‌های کپسول با N در نظر گرفته شده است. مشخصات کلی مصالح بکار رفته در مدل عددی در «جدول ۱» آورده شده است.

و همچنین «شکل ۲» هندسه مدل عددی مش بندی و نمونه کپسول ساخته شده در نرم افزار Plaxis 2D را نشان می‌دهد.

در مطالعه حاضر به بررسی ابعاد بهینه، تاثیر تعداد لایه‌های تسلیح، عمق بهینه قرارگیری کپسول‌ها پرداخته شده است. بدین منظور استفاده از کپسول ژئوگرید از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر از دیگر مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک، مانند ژئوسل می‌باشد و می‌تواند کاربردهای آن‌ها را به همراه داشته باشد.

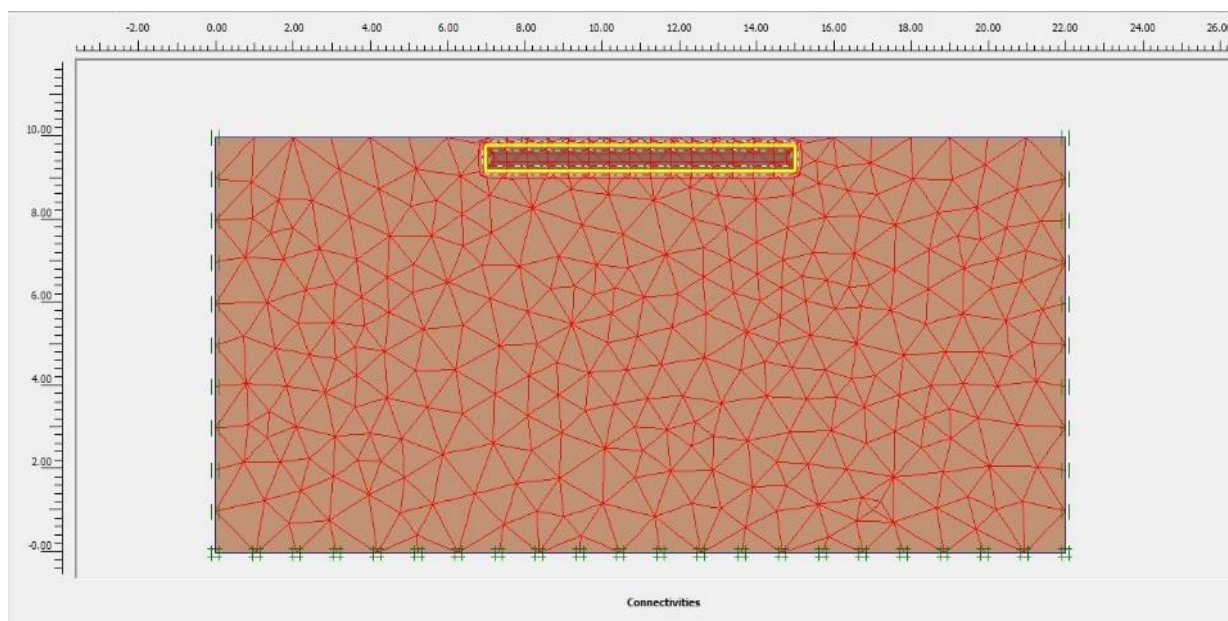
۲- مدلسازی عددی

برای شبیه‌سازی مدل تاثیر کپسول ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری نهایی خاک از نرم افزار المان محدود Plaxis 2D استفاده شده است. سپس برای صحت سنجی نتایج مدل عددی مدل‌ها با یک دستگاه بارگذاری ابداعی که در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه آزاد همدان قرار دارد مدلسازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای این منظور از مدلسازی نوینی استفاده شده است. بدین منظور که کپسول ژئوگرید از قرارگیری ژئوگرید به صورت دو لایه روی هم مدل شده‌اند سپس داخل کپسول از ماسه مقاوم پر شده است. مدل ساخته شده با ارتفاع ۱۰ متر و عرض ۲۲ متر در نظر گرفته شده است در این مدل از دو نوع مصالح خاکی ماسه سست و ماسه مقاوم استفاده شده است و پی نواری با عرض ۲ متر در سطح زمین و در مرکز مدل واقع بر خاک ماسه‌ای سست مدلسازی شد. در مدلسازی از المان‌های ۱۵

جدول ۱. مشخصات مصالح به کار رفته در مدل عددی

Table 1. Properties of materials used in the numerical analyses

مقدار	واحد	نماد لاتین	پارامتر	مصالح
۸×۱۰^۳	KN/m ²	E _s	مدول الاستیسیته خاک	ماسه سست
۳۵	درجه (°)	φ	زاویه اصطکاک داخلی	
۱۰	KN/m ²	C	چسبندگی	
۰/۳	-	ν	ضریب پواسون	
۲۰	KN/m ³	γ	وزن مخصوص خاک	
۵	درجه (°)	ψ	زاویه اتساع	
۱	-	R _{int}	ضریب اینترفیس	
۶۷×۱۰^۳	KN/m ²	E _s	مدول الاستیسیته خاک	ماسه مقاوم
۴۰	درجه (°)	φ	زاویه اصطکاک داخلی	
۲۵	KN/m ²	C	چسبندگی	
۰/۳۵	-	ν	ضریب پواسون	
۲۰	KN/m ³	γ	وزن مخصوص خاک	
۱۰	درجه (°)	ψ	زاویه اتساع	
۱	-	R _{int}	ضریب اینترفیس	
۵×۱۰^۳	KN/m	EA	مقاومت محوری	ژئوگرید



شکل ۲. هندسه مدل عددی شبکه‌بندی شده و کپسول ساخته شده در نرم افزار Plaxis 2D

Fig. 2. General layout of the numerical model for the reinforced footing and capsule made in Plaxis 2D software

جدول ۲. خلاصه برنامه تحلیل‌ها

Table 2. Summary of analysis program

u/B	b/B	h/B	N	Test condition
-	-	-	-	۱
۰/۱،۰/۲۵،۰/۵۰/۷۵،۱	۲،۳،۴	۰/۰۵،۰/۱،۰/۲،۰/۳	۱،۲،۳	۳۰



شکل ۳. نمای کلی و مشخصات دستگاه بارگذاری

Fig. 3. Characteristics of loading mechanism

- تغییر مکان سنج برای اندازه‌گیری نشست پی نواری با دقت 0.1 mm بوده است.
- پی شبیه سازی شده آهنی به طول 300 میلی‌متر و عرض 50 میلی‌متر و ضخامت 30 میلی‌متر که زیر جک متصل می‌باشد.

۵- مصالح مورد استفاده در آزمایش

برای انجام آزمایش از دو نوع مصالح خاک ماسه سیلیسی و شن که بر اساس طبقه بندی متحد از نوع بد دانه بندی (SP, GP) می‌باشند استفاده شده است. که مشخصات این مصالح با انجام آزمایش‌های دانه‌بندی (ASTM D 422-87)، تعیین دانسیته خشک و آزمایش برش مستقیم بدست آمده است که مشخصات آن‌ها در «جدول ۳» و نمودار دانه‌بندی آن‌ها در «شکل ۴ و ۵»

۳- برنامه تحلیل‌ها

در راستای بررسی عوامل مؤثر بر ظرفیت باربری پی نواری تعداد ۱ تحلیل در حالت غیر مسلح و ۳۰ تحلیل در حالت مسلح برنامه‌ریزی و انجام گرفت. تعداد لایه‌ها و طول مسلح کننده‌ها، فاصله مسلح کننده‌ها از هم و از کف پی و ضخامت کپسول از جمله متغیرهایی بودند که به منظور بررسی تأثیر بر ظرفیت باربری پی نواری مورد ارزیابی قرار گرفتند. خلاصه برنامه تحلیل‌ها در «جدول ۲» ارائه گردیده است.

۴- مشخصات مدل آزمایشگاهی

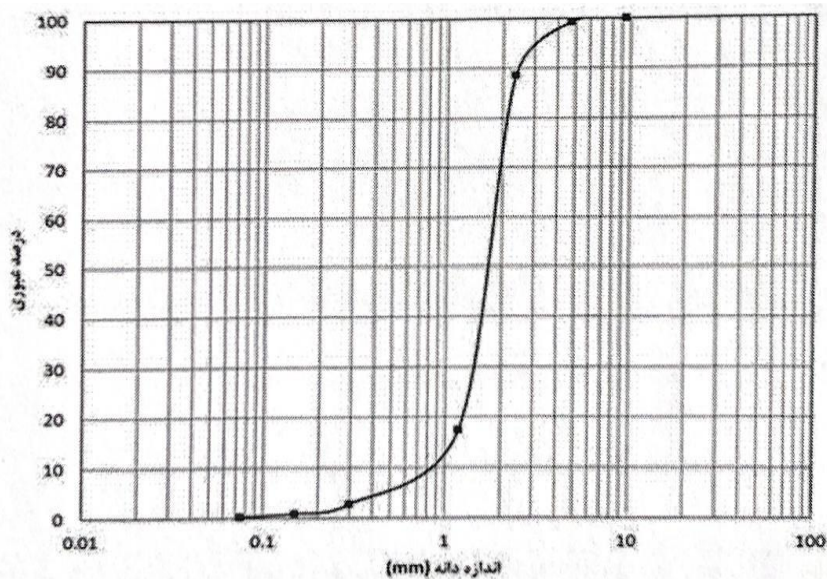
برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه بارگذاری کوچک مقیاس ابداعی استفاده گردید. قسمت‌های اصلی این دستگاه همانطور که در «شکل ۳» نشان داده شده است عبارتند از:

- بدنه اصلی دستگاه.
- محفظه فلزی به ابعاد $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ (ارتفاع * عرض * طول) که جهت ساخت و آماده سازی نمونه‌ها به کار می‌رود.
- محفظه مورد نظر جهت اجرای برنامه آزمایش‌ها شامل چهار وجه فلزی (سه وجه جانبی و کف) و یک وجه شیشه‌ای به جهت مشاهده و عکس برداری تغییر شکل‌های بوجود آمده در خاک می‌باشد. در ضمن این محفظه دارای چهار چرخ بلب‌رینگ جهت حرکت راحت‌تر و نقل انتقال آن می‌باشد.
- جک هیدرولیکی به جهت اعمال نیرو به پی.
- سیستم قرائت نیرو که این سیستم به وسیله یک پردازش‌گر داخلی کنترل می‌شود و جریان خروجی از حس‌گر اندازه‌گیری بار را دریافت کرده و سپس جریان ورودی در واحد قرائت که به صورت پیوسته بوده را به جریان‌های غیر پیوسته و عددی تبدیل می‌کند (در واقع نیروی قرائت شده توسط لودسل را نشان می‌دهد).
- نیروسنج (لودسل) با ظرفیت 500 کیلوگرم جهت اندازه‌گیری بارگذاری انجام شده از طرف جک هیدرولیکی.

جدول ۳. مشخصات ماسه و شن

Table 3. Sand and Gravel Characteristics

نوع خاک	پارامتر	نماد لاتین	واحد	مقدار
ماسه سیلیسی (SP)	مدول الاستیسیته خاک	E_s	KN/m^2	15×10^3
	زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	درجه ($^\circ$)	۳۴
	چسبندگی	C	KN/m^2	۱
	ضریب پواسون	ν	-	۰/۳
	وزن مخصوص خاک	γ	KN/m^3	۱۹/۵
شن (GP)	مدول الاستیسیته خاک	E_s	KN/m^2	5×10^4
	زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	درجه ($^\circ$)	۳۸
	چسبندگی	C	KN/m^2	۱
	ضریب پواسون	ν	-	۰/۳۵
	وزن مخصوص خاک	γ	KN/m^3	۲۰

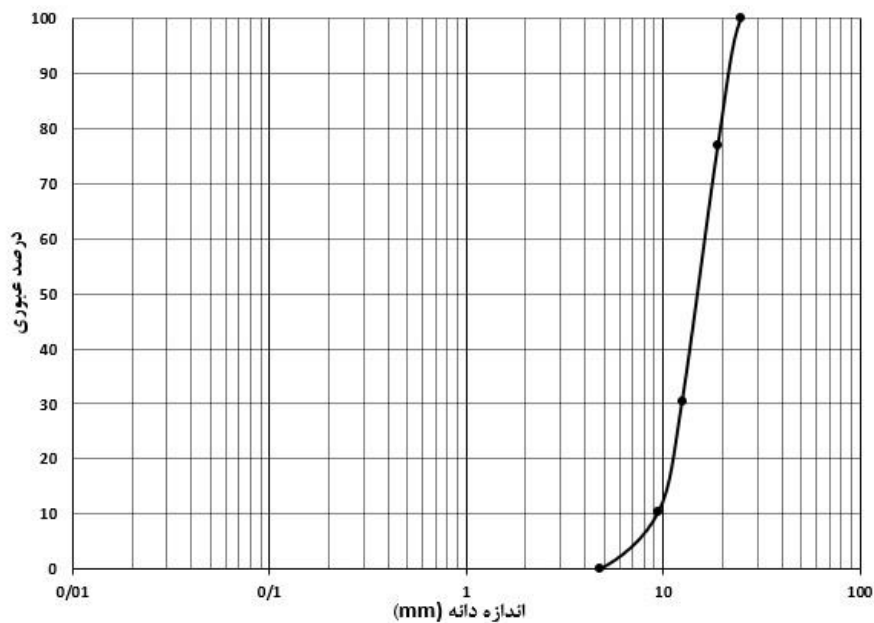


شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده

Fig. 4. Gran size curve for sand soil

می‌باشد. در عمل یا در پروژه‌های اجرایی بعد از نصب ژئوگرید در عمق مورد نظر و اجرا خاک بر روی آن ژئوگرید خارج از محدوده مورد نظر به شکل رپ راند بر روی خاک ریزی برگردانده شده و کپسول ژئوگریدی تشکیل می‌گردد و کپسول‌های بعدی نیز در هر عمق مانند اجرای لایه‌های ژئوگرید و به شکل توضیحات فوق اجرا می‌گردد. «جدول ۴» مشخصات ژئوگرید مورد استفاده و «شکل ۶» کپسول ساخته شده را نشان می‌دهد.

نشان داده شده است. در مدل‌سازی آزمایشگاهی از ژئوگرید راکشیلد به عنوان مسلح کننده استفاده گردید و برای ساخت کپسول از رپ راند کردن ژئوگرید بر روی هم و همپوشانی به اندازه ۱/۵ سانتی متر کمک گرفته شده است. که بعد از همپوشانی شبکه‌های ژئوگرید به صورت دو شبکه در میان توسط مفتول سیمی به هم دوخته شد. شکل ۶ - الف شکل فضایی پس از ایجاد کپسول



شکل ۵. نمودار دانه‌بندی شن مورد استفاده

Fig. 5. Gran size curve for Gravel soil

جدول ۴. مشخصات ژئوگرید استفاده شده در آزمایش‌ها

Table 4. Geogrid Characteristics

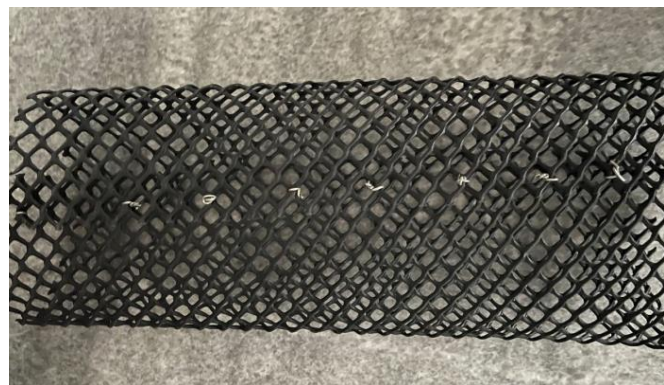
Sample	No.	Propenty	Unit	Test metod	Value
Rock Shield	MD	Max Load at yield point	KN/M	ASTM D6637	9.83
		Extension at Max Load	%	ASTM D6637	34.4
		Load at Ten percent Extension of Gauge Length	KN/M	ASTM D6637	3.125
		Extension at 1/2 Max Load	%	ASTM D6637	0.05
	TD	Max Load at yield point	KN/M	ASTM D6637	6.54
		Extension at Max Load	%	ASTM D6637	65
		Load at Ten percent Extension of Gauge Length	KN/M	ASTM D6637	3.14
		Extension at 1/2 Max Load	%	ASTM D6637	11
	-	Water absorption	%wt	ASTM D570	0
		Mass Per Unit Are	Gr/m ²	ISO 9864	878 ± 12
		MFI(rate 190°C,5kg)	Gr/10min	ASTM D1238	1/05
		Thickness	mm	-	3.7 ± 1
		Mesh aperture size	mm	-	10*10
		Impact Strength (again)	Kj/m ²	ASTM D256	38/5

۶- نحوه تهیه و ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

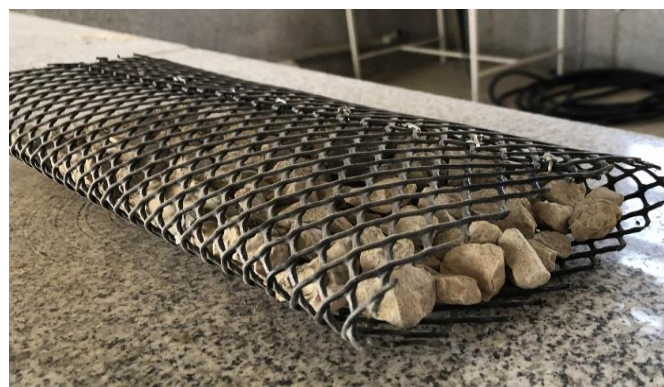
در این پژوهش به منظور بررسی و مقایسه تاثیر پارامترها کلیه آزمایش‌ها در حالات خشک انجام شده است. کل ارتفاع خاک در مخزن آزمایش به میزان ۳۰ سانتی متر است. مخزن دستگاه آزمایش را با روش بارش ماسه (اصول کلی این روش بر اساس مطالعه انجام شده توسط کول بوزفکیف^۱ (۱۹۴۸) بنا نهاده شده است) بگونه‌ای که کمترین تراکم مورد نظر در آن صورت گیرد از خاک ماسه‌ای موجود در آزمایشگاه تا ارتفاع‌های مشخص پر شده تا سطح آن به گونه‌ای که فشاری به خاک منتقل نشود مسطح و افقی گردیده است. جهت اطمینان از افقی بودن از تراز استفاده شد. سپس کپسول ژئوگرید در حمل مورد نظر از مصالح شنی ایجاد گردید. روی خاک ماسه‌ای پس از قرار گیری کپسول ژئوگرید در محل با روش بارش ماسه کپسول در خاک مدفون گردید و سطح آن مسطح شد. لازم به ذکر است که در کلیه آزمایش‌ها خاک داخل مخزن بعد از هر آزمایش تخلیه شده و مجدد به صورت بارشی تا ارتفاع مورد نظر پر شده است. در ادامه پی نواری فلزی که بر روی آن یک پیچ تعبیه گردیده بود (در مرکز پی نواری) به آرامی و با توجه به بر هم نزدن سطح صاف خاک به اهرم جک بسته شده و سیستم برای اعمال بار آماده می‌گردید. در مرحله اعمال بار در هر گام از آزمایش توسط جک هیدرولیکی تغییر مکان ثابتی به پی نواری اعمال و ضمن ثابت نگه داشتن وزن مخصوص خاک سرعت بارگذاری 1 mm/min در نظر گرفته شد. باید توجه داشت که برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی می‌توان از هر یک از دو معیار گسیختگی برشی در خاک زیر پی و یا نشست پی استفاده نمود. در این پژوهش معیار دوم یعنی نشست پی ملاک عمل قرار گرفته است. بر طبق نظر داس (۱۹۴۸) بار نهایی در حالت گسیختگی برشی کلی نشست در حدود ۴ تا ۱۰ درصد عرض شالوده و در حالت گسیختگی برشی موضعی و سوراخ کننده بار نهایی در نشست در حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد عرض شالوده رخ می‌دهد [۱۴]. لذا بارگذاری در این پژوهش نیز تا نشست معادل ۳۰ درصد عرض پی (۱۵ mm) ادامه یافته است و ظرفیت باربری بدست آمده در نقطه نشست ۱۵ mm به عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شد.

۷- آنالیز حساسیت

در کلیه تحلیل‌ها که مراحل انجام آن ذکر شده است به منظور مقایسه و بررسی نتایج و نتیجه‌گیری در مورد تاثیر پارامترها بر ظرفیت باربری پی



الف: شکل کپسول ساخته شده خالی از مصالح از نمای فوقانی



ب: شکل کپسول ساخته شده با مصالح از نمای جانبی

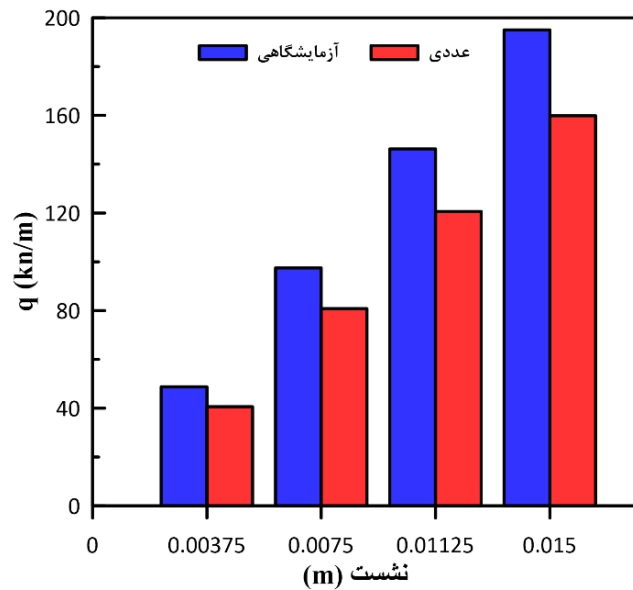


پ: شکل نحوه قرارگیری کپسول ژئوگرید بر روی بستر ماسه‌ای

شکل ۶. کپسول مورد استفاده در مدل

Fig. 6. The capsule used in the model

1. kolbuszewskif



شکل ۷. مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان حالت $u/B = 0.1$, $b/B = 3$, $h/B = 0.3$ در مدل آزمایشگاهی و عددی

Fig. 7. Comparison of the force-displacement diagram of $h/B = 0.3$, $b/B = 3$ and $u/B = 0.1$ in experimental and numerical models

۹- ارائه نتایج و تفسیر داده‌ها

افزایش در ظرفیت باربری به دلیل مسلح نمودن خاک به صورت پارامتر بدون بعد BCR (نسبت ظرفیت باربری) بیان می‌شود که برای مقایسه‌ی ظرفیت باربری در حالت مسلح و غیر مسلح با همدیگر استفاده شده است و به صورت « روابط ۱ و ۲ » تعریف می‌گردد:

$$BCR_1 = \frac{qr_1}{q} \quad (1)$$

پارامترهای رابطه ۱ به صورت زیر تعریف شده است:

q_{r1} : ظرفیت باربری نهایی پی متکی بر بستر افقی مسلح شده با ژئوگرید

q : ظرفیت باربری نهایی پی متکی بر خاک غیر مسلح

$$BCR_2 = \frac{qr_2}{q} \quad (2)$$

پارامترهای رابطه ۲ به صورت زیر تعریف شده است:

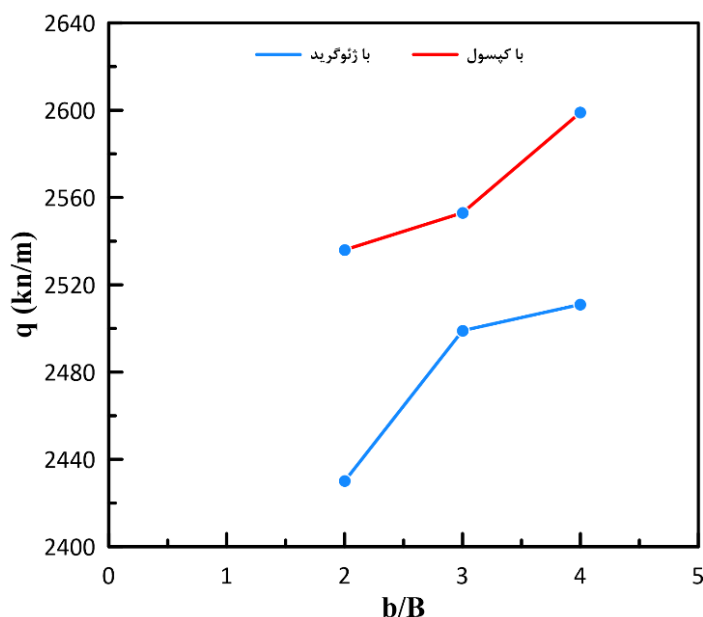
q_{r2} : ظرفیت باربری نهایی پی متکی بر بستر افقی مسلح شده با کپسول

q : ظرفیت باربری نهایی پی متکی بر خاک غیر مسلح

نواری تغییراتی در این پارامترها به صورت هدف گذاری شده اعمال شده است. همه پارامترها به صورت بدون بعد و نرمال شده به عرض پی (B) مانند h/B , u/B و b/B به کار رفته‌اند.

۸- صحت سنجی نتایج

با توجه به اینکه تا کنون مطالعات جامعی بر روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی با کپسول ژئوگرید انجام نشده است در این بخش با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی (نتایج کوچک مقیاس) با نتایج روش‌های عددی و به کمک نرم افزار المان محدود Plaxis 2D مورد صحت سنجی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مشخصات خاک و مسلح کننده در مدل عددی مطابق « جدول ۳ و ۴ » منطبق مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. « شکل ۷ » نشان می‌دهند که نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی اختلاف جزئی با یکدیگر دارند که اختلاف آن‌ها ۲۲ درصد می‌باشد که این اختلافات ناشی از نوع مدل گسیختگی برای تحلیل عددی، شرایط مرزی، شرایط کرنش مسطح و پارامترهای تخصیص داده شده به خاک می‌باشد. اما در کل در هر سری نمودارهای نیرو - تغییر مکان با وجود اختلاف ارقام روندها حدوداً مشابه بوده و این حاکی از صحیح بودن نتایج می‌باشد.



شکل ۸. نمودار مقایسه ظرفیت باربری برای حالت ژئوگرید و کپسول با $h=0.05B$

Fig. 8. Comparison diagram of bearing capacity for geogrid and capsule mode with $h=0.05B$

است و فاصله مسلح کننده‌ها تا تراز کف پی ($\frac{u}{B} = 0.1$) ثابت نگه داشته شده است. در این نمودارها به میزان تأثیر پارامتر طول مسلح کننده و ارتفاع کپسول و نحوه تأثیر آن در عملکرد خاک مسلح پرداخته می‌شود.

«شکل ۸» نمودار ظرفیت باربری پی نواری برای حالتی که ارتفاع کپسول برابر $h=0.05B$ می‌باشد را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از این نمودار ظرفیت باربری پی نواری در فاصله $u=0.1B$ در نسبت طول ژئوگرید ۴ و ۳ به ترتیب ۳/۳ درصد، ۶/۲۵ درصد و ۶/۷ درصد و در فاصله $u=0.1B$ در نسبت طول کپسول ژئوگرید ۴ و ۳ به ترتیب ۷/۸ درصد، ۸/۵ درصد و ۱۰/۵ درصد نسبت به حالت غیر مسلح افزایش یافته است.

«شکل ۹» نمودار ظرفیت باربری پی نواری برای حالتی که ارتفاع کپسول برابر $h=0.3B$ می‌باشد را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از این نمودار ظرفیت باربری پی نواری در فاصله $u=0.1B$ در نسبت طول کپسول ژئوگرید ۴ و ۳ به ترتیب ۲۳/۵ درصد، ۲۳/۹ درصد و ۲۶ درصد نسبت به حالت غیر مسلح افزایش یافته است.

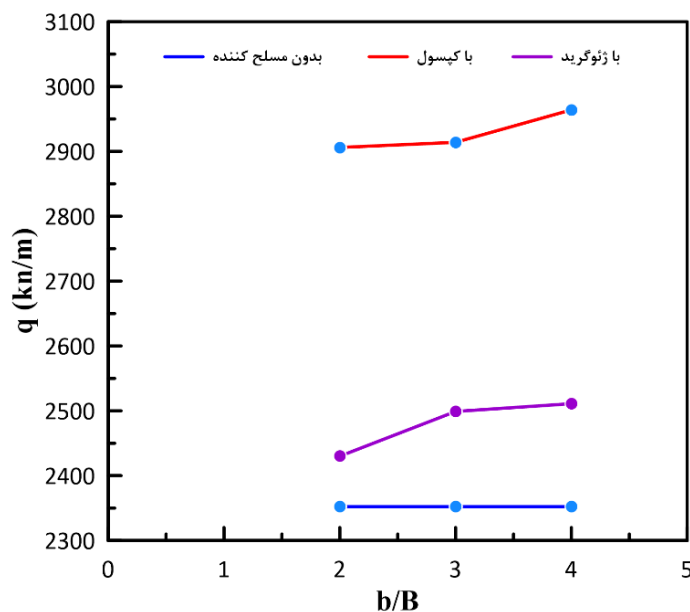
همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود واضح است که عملکرد مسلح کننده‌ها با افزایش در طول آن بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. در مسلح سازی با ژئوگرید و کپسول ژئوگرید این مسلح کننده‌ها به شکل یک دال گسترده عمل می‌کنند و به همین دلیل می‌توان از توسعه سطح گسیختگی جلوگیری کنند و بارهای وارده را در یک ناحیه گسترده تر باز

در ادامه جهت آنالیز حساسیت تأثیر پارامترهایی همچون فاصله مسلح کننده از تراز زیر کف پی، طول، تعداد لایه‌های مسلح کننده‌ها، ضخامت لایه کپسول نسبت ظرفیت باربری (BCR) و ظرفیت باربری در حالات مختلف ترسیم و مقایسه شده است. بدین جهت پارامتری را که قرار است میزان و نحوه تأثیرش در تحلیل‌ها مشخص گردد به عنوان پارامتر متغیر و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است. به طور کلی دو دسته نمودار برای این موارد که شامل نمودار ظرفیت باربری و نمودار BCR می‌باشد ترسیم شده است. در این نمودارها کلیه نقاط ثبت شده در حین آنالیز از شروع تا پایان نشست مورد نظر جهت تحلیل و بررسی قابل مشاهده می‌باشد.

۹-۱- تأثیر طول مسلح کننده بر ظرفیت باربری پی نواری

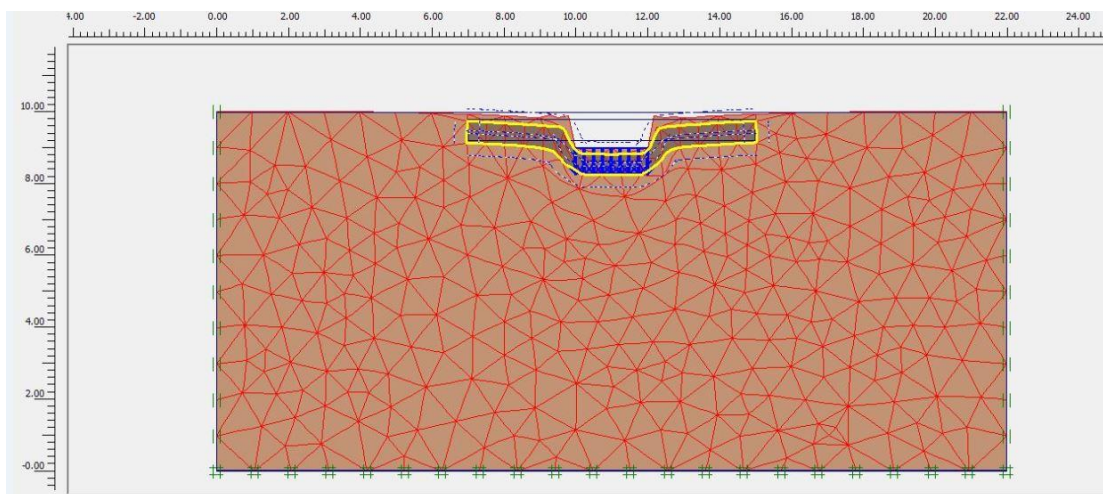
با توجه به اینکه مسلح کننده (ژئوگرید و کپسول) با ۳ طول مختلف یعنی $\frac{b}{B} = 2.3, 4$ در بستر خاک قرار گرفته است جهت ارزیابی اثر آن در ظرفیت باربری پی نواری نتایج آن بصورت مختصر در اینجا ذکر می‌گردد.

«شکل ۸ و ۹» نمودار نشست بستر افقی مسلح شده با یک لایه ژئوگرید و یک لایه کپسول و همچنین نمودار بستر بدون مسلح کننده با یک لایه کپسول را به جهت بررسی تأثیر طول مسلح کننده بر ظرفیت باربری پی نواری نشان می‌دهد. در تحلیل حاضر پارامترهای طول ($\frac{b}{B} = 2.3, 4$) و ارتفاع کپسول ($\frac{h}{B} = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$) متغیر در نظر گرفته شده



شکل ۹. نمودار مقایسه ظرفیت باربری برای حالت بدون مسلح کننده، با ژئوگرید و کپسول با $h=0.3B$

Fig. 9. Comparison diagram of bearing capacity for for the case without reinforcement, with geogrid and capsule mode with $h=0.3B$



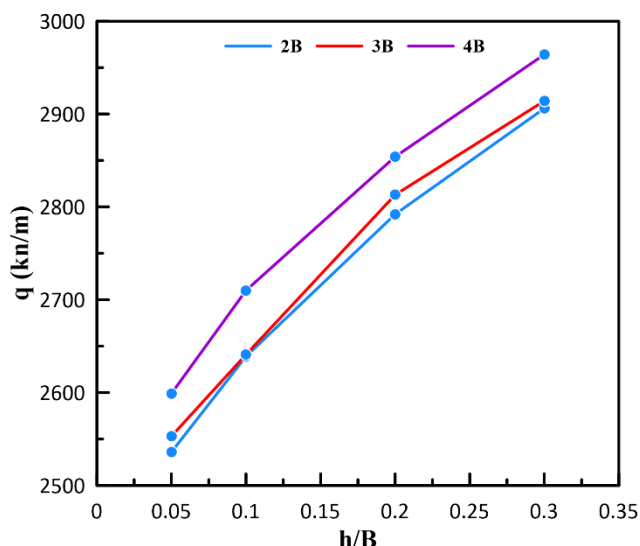
شکل ۱۰. تغییر شکل نمونه کپسول ژئوگرید با $h=0.3B$

Fig. 10. Deformation of the capsule sample with $h=0.3B$

۹-۲- تاثیر ارتفاع کپسول بر ظرفیت باربری پی نواری
در این تحقیق کپسول با ۴ ارتفاع مختلف یعنی $0.3, 0.2, 0.1, 0.05$ در بستر خاک جهت ارزیابی اثر آن و رسیدن به شرایط بهینه در ظرفیت باربری پی نواری مورد بررسی قرار گرفت.
در این بخش پارامترهای طول ($\frac{b}{B} = 2, 3, 4$) و ارتفاع کپسول (0.3 ،

توزیع کنند. همچنین با افزایش طول مسلح کننده‌ها می‌توان به صلبیت بسترهای افقی افزود که این خود سبب افزایش ظرفیت باربری خاک مسلح و عملکرد بهتر خاک در برابر نشست می‌شود.

«شکل ۱۰» نمونه‌ای از تغییر شکل مدل نمونه در مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه ظرفیت باربری پی برای حالت کپسول با ضخامت‌های متفاوت $h=0.05B$, $h=0.1B$, $B=0.2B$ و $h=0.3B$

Fig. 11. Comparison diagram of the bearing capacity of the foundation for the case of capsules with different thicknesses $h=0.05B$, $h=0.1B$, $h=0.2B$, $h=0.3B$

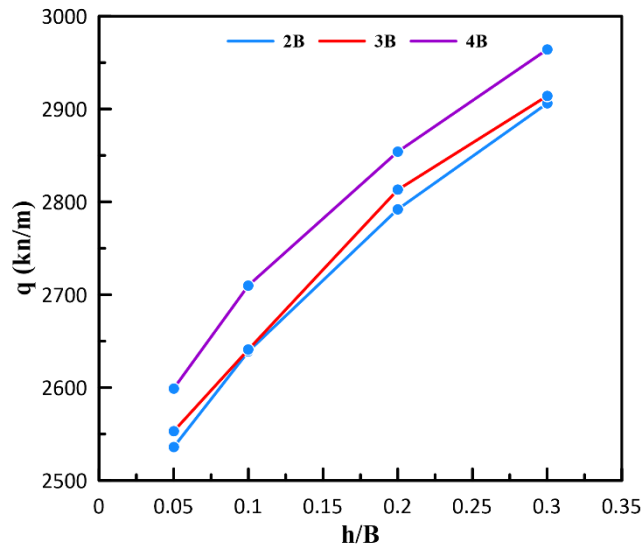
۲۱/۳ درصد و ۲۶ درصد افزایش نسبت به حالت غیر مسلح صورت پذیرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین بهبود عملکرد ایجاد شده زمانی است که ارتفاع کپسول برابر $0.3B$ در نظر گرفته شده است.

۹-۳- تاثیر فاصله قرارگیری کپسول از زیر پی بر ظرفیت باربری پی نواری

در این تحقیق کپسول در ۵ فاصله مختلف یعنی ۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۰، $\frac{u}{B}$ در بستر خاک از زیر پی به جهت ارزیابی اثر آن و رسیدن به شرایط بهینه در ظرفیت باربری پی نواری مورد بررسی قرار گرفت.

در این بخش پارامتر طول $\frac{b}{B} = 4$ و ارتفاع کپسول $0.3B$ در حالتی که بیشترین ظرفیت باربری را ایجاد کرده‌اند ثابت نگاه داشته شده است. فاصله کپسول ژئوگرید تا تراز کف (۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۰) و $\left(\frac{u}{B} = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1\right)$ تعداد لایه‌های کپسول (یک لایه، دو لایه و سه لایه) متغیر نگاه داشته شده است. «شکل ۱۲» نشان می‌دهد که عملکرد خاک مسلح شده با افزایش تعداد لایه‌های کپسول بهبود چشمگیری در عملکرد خاک داشته است که سبب افزایش ظرفیت باربری خاک شده است. همانطور که در «شکل ۱۲» مشاهده می‌شود با افزایش فاصله کپسول‌ها از تراز زیر کف پی و از همدیگر زاویه شیب نمودار در لایه‌های متفاوت کپسول (یک لایه، دو لایه و سه لایه) کاهش می‌یابد. این امر بیان کننده آن است که با افزایش فاصله از

$\left(\frac{h}{B} = 0.05, 0.1, 0.2\right)$ متغیر در نظر گرفته شده است و فاصله مسلح کننده‌ها تا تراز کف پی $\left(\frac{u}{B} = 0.1\right)$ ثابت نگه داشته شده است. «شکل ۱۱» نشان می‌دهد که عملکرد خاک مسلح شده با کپسول ژئوگرید بهبود چشمگیری نسبت به عملکرد خاک داشته است که سبب افزایش ظرفیت باربری خاک شده است. با توجه به این که لایه کپسول ژئوگرید رفتاری شبیه به یک تیر دارد و بار خمشی نیز تحمل می‌کند افزایش ارتفاع لایه کپسول ژئوگرید به صلبیت بیشتر آن کمک می‌کند. افزایش لایه کپسول ژئوگرید باید تا جایی ادامه یابد که کماتش موضعی در کپسول رخ ندهد. همانطور که در «شکل ۱۱» مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت کپسول زاویه شیب نمودار در طول‌های متفاوت افزایش می‌یابد که این افزایش ظرفیت باربری به سبب صلبیت ایجاد شده در بستر افقی رخ می‌دهد و سبب ایجاد گیرداری بیشتر بین کپسول و خاک می‌گردد. «شکل ۱۱» نشان می‌دهد که هر چه ضخامت کپسول از $0.05B$ به $0.3B$ افزایش می‌یابد سبب افزایش ظرفیت باربری در طول‌های $\frac{b}{B} = 2.3, 4$ می‌گردد. که نتیجه این افزایش ظرفیت باربری در طول $2B$ برای ضخامت $0.05B$, $0.1B$, $0.2B$ و $0.3B$ به ترتیب ۷/۸ درصد، ۱۲/۲ درصد، ۱۸/۷ درصد و ۲۳/۵ درصد و در طول $3B$ برای ضخامت $0.05B$, $0.1B$, $0.2B$ و $0.3B$ به ترتیب ۸/۵ درصد، ۱۲/۲ درصد، ۱۹/۶ درصد و ۲۳/۸ درصد و در نهایت در طول $4B$ برای ضخامت $0.05B$, $0.1B$, $0.2B$ و $0.3B$ به ترتیب ۱۰/۵ درصد، ۱۵/۲ درصد،



شکل ۱۱. نمودار مقایسه ظرفیت باربری پی برای حالت کپسول با ضخامت‌های متفاوت $h=0.05B$, $h=0.1B$, $h=0.2B$ و $h=0.3B$

Fig. 11. Comparison diagram of the bearing capacity of the foundation for the case of capsules with different thicknesses $h=0.05B$, $h=0.1B$, $h=0.2B$, $h=0.3B$

بین خاک و کپسول به صورت انتقال ناحیه‌ی برش خورده به قسمت پایین‌تر و عمیق‌تر و افزایش ناحیه‌ی گسیختگی توسط لایه‌های کپسول در عمق صورت می‌گیرد.

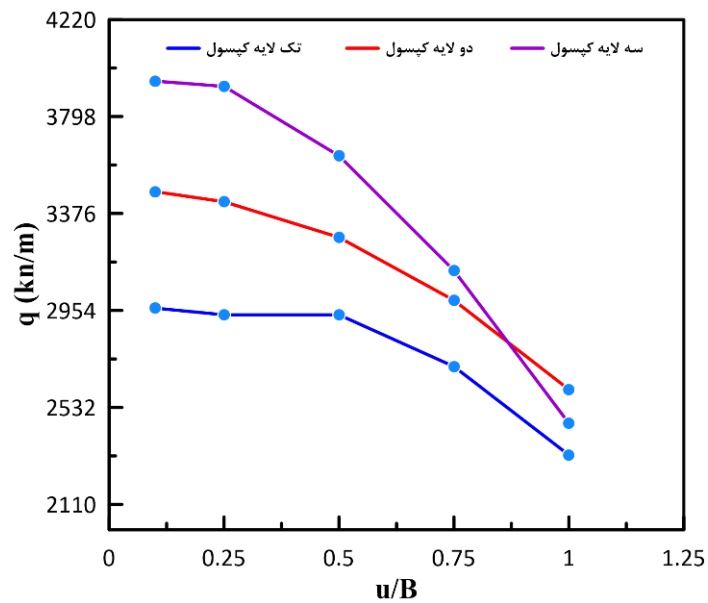
۹-۴- تأثیر طول مسلح کننده‌ها بر $BCR_{1,2}$

با توجه به اینکه مسلح کننده (ژئوگرید و کپسول) با ۳ طول مختلف یعنی $\frac{b}{B} = 2, 3, 4$ در بستر خاک قرار گرفته است. جهت ارزیابی اثر آن در $BCR_{1,2}$ نتایج آن بصورت مختصر در اینجا ذکر می‌گردد.

در «شکل ۱۳ و ۱۴» نمودار نشست بستر افقی مسلح شده با تک لایه ژئوگرید و تک لایه کپسول را به جهت بررسی تأثیر طول مسلح کننده بر $BCR_{1,2}$ را نشان می‌دهد. در تحلیل حاضر پارامترهای طول $(\frac{b}{B} = 2, 3, 4)$ و ارتفاع کپسول $(\frac{h}{B} = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3)$ متغیر در نظر گرفته شده است و فاصله مسلح کننده‌ها تا تراز کف پی $(\frac{u}{B} = 0.1)$ ثابت نگه داشته شده است. در این نمودارها به میزان تأثیر پارامتر طول مسلح کننده و ارتفاع کپسول و نحوه تأثیر آن در عملکرد خاک مسلح پرداخته می‌شود.

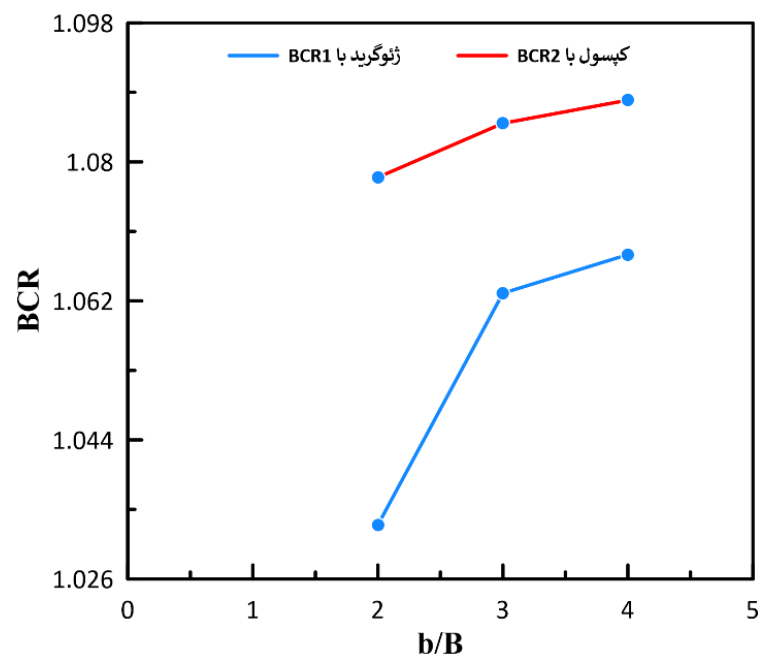
«شکل ۱۳» نمودار $BCR_{1,2}$ برای حالتی که ارتفاع کپسول برابر B می‌باشد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش طول مسلح کننده‌ها از $2B$ به $4B$ نسبت ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. که طبق نتایج حاصل از این نمودار BCR_1 در فاصله $u = 0.1B$ در حالت ژئوگرید $3/4$ درصد و BCR_2 در فاصله $u = 0.1B$ در حالت کپسول

تراز کف پی و با افزایش فاصله کپسول‌ها از یکدیگر در فاصله‌های $0.1B$ تا $1B$ ظرفیت باربری کاهش می‌یابد (یعنی هر چقدر فاصله کپسول‌ها از کف پی و از یکدیگر از فاصله $0.1B$ به فاصله $1B$ دورتر می‌شوند ظرفیت باربری کاهش می‌یابد). نتیجه این کاهش ظرفیت باربری با تک لایه کپسول ژئوگرید در فاصله $0.1B$ ، $0.25B$ ، $0.5B$ ، $0.75B$ و $1B$ به ترتیب ۲۶ درصد، ۲۴/۸ درصد، ۲۴/۸ درصد، ۱۵/۲ درصد و ۱/۱ درصد، در حالت دو لایه کپسول ژئوگرید در فاصله $0.1B$ ، $0.25B$ ، $0.5B$ ، $0.75B$ و $1B$ به ترتیب ۴۷/۶ درصد، ۴۵/۷ درصد، ۳۹/۱ درصد، ۲۷/۵ درصد و ۱۱ درصد و در نهایت در حالت سه لایه کپسول ژئوگرید در فاصله $0.1B$ ، $0.25B$ ، $0.5B$ ، $0.75B$ و $1B$ به ترتیب ۶۸ درصد، ۶۷ درصد، ۵۴/۲ درصد، ۳۲/۹ درصد و ۴/۷ درصد نسبت به حالت غیر مسلح می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان به این نتیجه رسید که در این تحقیق بهترین فاصله قرارگیری کپسول از زیر کف پی و از یکدیگر در فاصله $0.1B$ با سه لایه کپسول ژئوگرید می‌باشد زیرا ظرفیت باربری توسط خاک حاوی این مقادیر به میزان محسوسی افزایش یافته است و سبب ایجاد صلبیت و گیرداری بیشتر در خاک می‌گردد. و به دلیل اقتصادی و کند شدن روند افزایش ظرفیت باربری در مقادیر بالاتر توجیهی برای افزایش بیشتر در مقادیر H/B ، b/B و U/B وجود ندارد. همچنین در «شکل ۱۴» مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری پی نواری به ازای افزایش تعداد لایه‌های کپسول ژئوگرید در آن دیده می‌شود چرا که در این حالت وقتی تعداد لایه‌های کپسول ژئوگرید افزایش می‌یابد اندرکنش



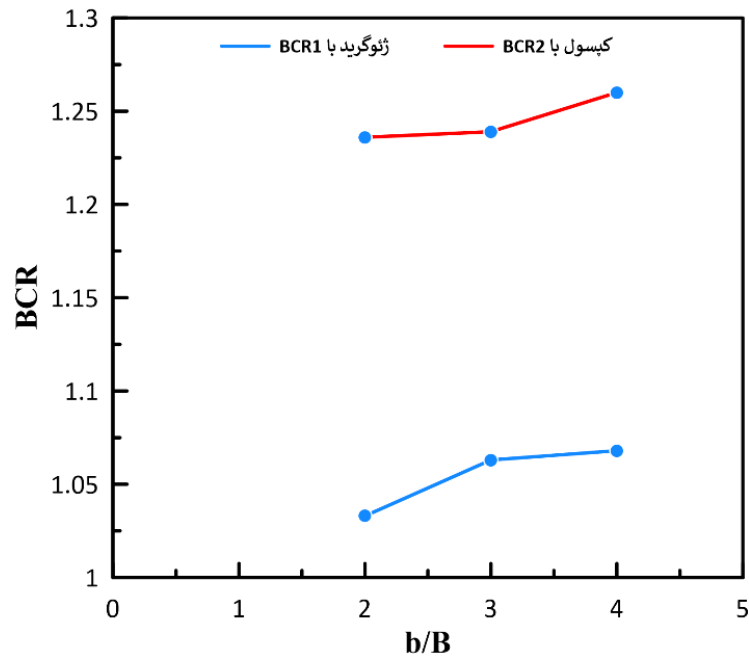
شکل ۱۲. نمودار مقایسه ظرفیت باربری پی برای حالت چند لایه‌های کپسول با فاصله‌های متفاوت از تراز کف پی
 $u=0.1B, u=0.25B, u=0.5B, u=0.75B, u=1B$

Fig. 12. Comparison diagram of the bearing capacity of the foundation for multiple capsule layers with different distances from foundation floor level $u=0.1B, u=0.25B, u=0.5B, u=0.75B, u=1B$



شکل ۱۳. نمودار تغییرات $BCR_{1,2}$ در بستر افقی مسلح شده با حالت ژئوگرید و کپسول با $h=0.05B$

Fig. 13. Diagram of $BCR_{1,2}$ changes in horizontal bed reinforced with geogrid and capsule with $h=0.05B$



شکل ۱۴. نمودار تغییرات BCR در بستر افقی مسلح شده با حالت ژئوگرید و کپسول با $h=0.3B$

Fig. 14. Diagram of BCR changes in horizontal bed reinforced with geogrid and capsule with $h=0.3B$

نسبت ظرفیت باربری خاک شده است. که هر چه ضخامت کپسول از B $0.5/$ به B $0.3/$ افزایش می‌یابد سبب افزایش نسبت ظرفیت باربری در طول‌های $2.3, 4/ = \frac{b}{B}$ می‌گردد که نتیجه این افزایش نسبت ظرفیت باربری در طول B 2 برابر $14/7$ درصد و در طول B 3 برابر $14/2$ درصد و در نهایت در طول B 4 برابر $15/8$ درصد افزایش صورت پذیرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین بهبود عملکرد ایجاد شده زمانی است که ارتفاع کپسول برابر B $0.3/$ در نظر گرفته شده است.

۹-۶- تاثیر فاصله قرارگیری کپسول از زیر پی نواری بر BCR_2

در این تحقیق کپسول در ۵ فاصله مختلف یعنی $1, 0.75, 0.5, 0.25, 0.1$ در بستر خاک از زیر پی به جهت ارزیابی اثر آن و رسیدن به شرایط بهینه در BCR_2 مورد بررسی قرار گرفت.

در این بخش پارامتر طول $4 = \frac{b}{B}$ و ارتفاع کپسول B $0.3/$ در حالتی که بیشترین ظرفیت باربری را ایجاد کرده‌اند ثابت نگاه داشته شده است. فاصله کپسول ژئوگرید تا تراز کف ($1, 0.75, 0.5, 0.25, 0.1$) و $(\frac{u}{B} = 0.1)$ و تعداد لایه‌های کپسول (یک لایه، دو لایه و سه لایه) متغیر نگاه داشته شده است. «شکل ۱۶» نشان می‌دهد که عملکرد خاک مسلح شده با افزایش

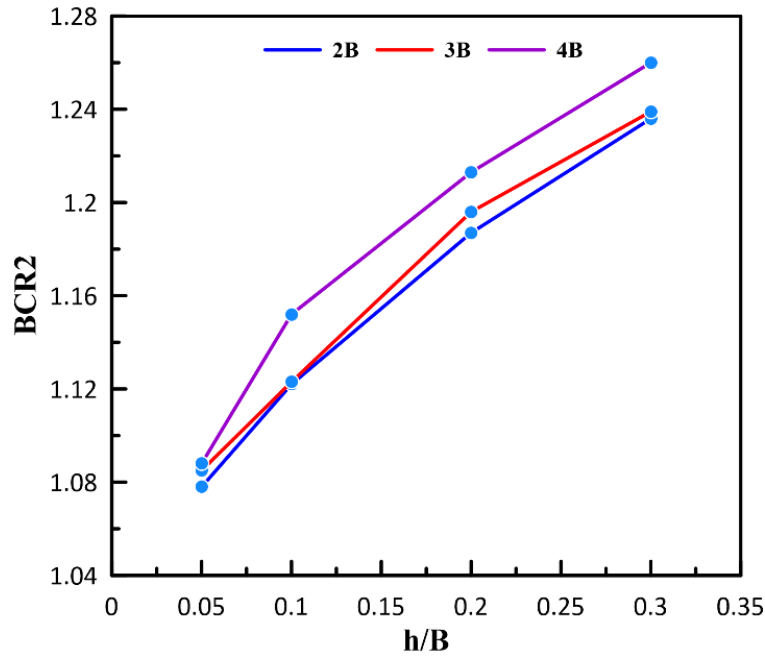
ژئوگرید $5/3$ درصد افزایش یافته است.

«شکل ۱۴» نمودار $BCR_{1,2}$ برای حالتی که ارتفاع کپسول برابر B $0.3/$ می‌باشد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش طول مسلح کننده‌ها از B 2 به B 4 نسبت ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. که طبق نتایج حاصل از این نمودار BCR_1 در فاصله B $0.1/$ در حالت ژئوگرید $3/4$ درصد و BCR_2 در فاصله B $0.1/$ در حالت کپسول ژئوگرید $16/9$ درصد افزایش یافته است.

۹-۵- تاثیر ضخامت کپسول بر BCR_2

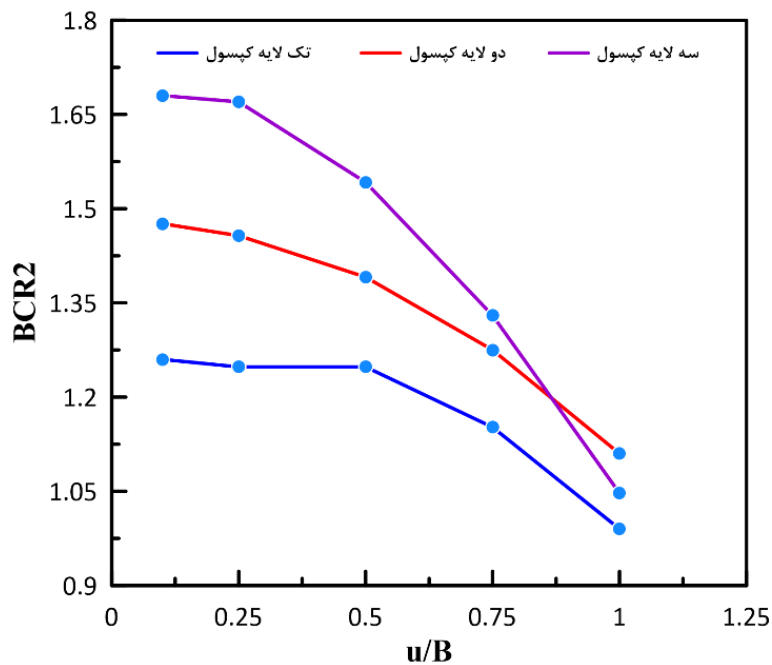
در این تحقیق کپسول با ۴ ارتفاع مختلف یعنی $0.3, 0.2, 0.1, 0.05$ در بستر خاک جهت ارزیابی اثر آن و رسیدن به شرایط بهینه در BCR_2 مورد بررسی قرار گرفت.

در این بخش پارامترهای طول ($2.3, 4 = \frac{b}{B}$) و ارتفاع کپسول ($0.3, 0.2, 0.1, 0.05 = \frac{h}{B}$) متغیر در نظر گرفته شده است و فاصله مسلح کننده‌ها تا تراز کف پی ($0.1 = \frac{u}{B}$) ثابت نگه داشته شده است. «شکل ۱۵» نشان می‌دهد که عملکرد خاک مسلح شده با کپسول ژئوگرید بهبود چشمگیری نسبت به عملکرد خاک داشته است که سبب افزایش



شکل ۱۵. نمودار تغییرات BCR_2 با تمرکز تاثیر ارتفاع کپسول با $h=0.05B$, $h=0.1B$, $h=0.2B$, $h=0.3B$

Fig. 15. Diagram of changes in BCR_2 focusing on the effect of capsule height with $h=0.05B$, $h=0.1B$, $h=0.2B$, $h=0.3B$



شکل ۱۶. نمودار تغییرات BCR_2 با تمرکز تاثیر فاصله های متفاوت کپسول ها از تراز کف پی و تعداد لایه های کپسول با $u=0.1B$, $u=0.25B$, $u=0.5B$, $u=0.75B$, $u=1B$

Fig. 16. Diagram of BCR_2 changes focusing on the effect of different distances of the capsules from the level of the foundation floor and the number of capsule layers with $u=0.1B$, $u=0.25B$, $u=0.5B$, $u=0.75B$, $u=1B$

یعنی $(\frac{b}{B}=4)$ را می‌توان به عنوان عرض موثر پذیرفت زیرا ظرفیت باربری توسط خاک حاوی این عرض مسلح کننده به میزان محسوسی افزایش یافته است و به دلیل مسائل اقتصادی و کند شدن روند افزایش ظرفیت باربری در عرض‌های بالاتر توجیهی برای افزایش بیشتر عرض کپسول وجود ندارد. ۳- با توجه به اینکه لایه کپسول رفتاری شبیه به یک تیر دارد و بار خمشی نیز تحمل می‌کند افزایش ارتفاع لایه کپسول به صلبیت بیشتر آن کمک می‌کند. افزایش ارتفاع لایه کپسول باید تا جایی ادامه یابد که کماتش موضعی در کپسول رخ ندهد که بیشترین بهبود عملکرد ایجاد شده زمانی است که ارتفاع کپسول $B/3$ یعنی $(\frac{h}{B}=0.33)$ گردیده است.

۴- تبدیل عملکرد لایه مسلح کننده کپسول با افزایش تعداد لایه‌های کپسول بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند زیرا با افزایش تعداد لایه‌های کپسول از توسعه سطح گسیختگی جلوگیری می‌شود و همچنین باعث ایجاد صلبیت بیشتر می‌شود که در این تحقیق بهترین و موثرترین حالت با تعداد یک تا سه لایه کپسول با فاصله $B/3$ یعنی $(\frac{u}{B}=0.33)$ و ارتفاع لایه‌های کپسول با $B/3$ یعنی $(\frac{h}{B}=0.33)$ می‌باشد.

۵- در تمامی حالات تحلیل خاک ماسه‌ای مسلح شده با کپسول افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت غیر مسلح حاصل شد که کمترین افزایش در تک لایه کپسول در حالت $(\frac{h}{B}=0.5)$ و $(\frac{b}{B}=2)$ بود که مقدار پارامتر BCR_2 در این حالت $1/0.78$ بدست آمد و بیشترین افزایش مربوط به حالت سه لایه کپسول در حالت $(\frac{h}{B}=0.33)$ و $(\frac{b}{B}=4)$ بود که مقدار پارامتر BCR_2 در این حالت $1/68$ حاصل شد.

منابع

- [1] M. Salehi, & M. Hosseini, Evaluation of the bearing behavior of strip foundations on stratified soil reinforced with geogrid, Omran Sharif J. Civil Eng, 2-31(4/1), 1394, 83-88. (in Persian)
- [2] S. Abrishami, & M. Hosseini, The effect of loading speed on the bearing capacity of strip foundations located on sandy soil reinforced with geogrid, Omran Sharif J. Civil Eng, 2-28(1), 1389, 39-47. (in Persian)
- [3] M. Rabeti Moghadam, J. Monfared, & M. Parvizi, Numerical investigation of the effect of geogrid on the ultimate bearing capacity of strip foundation under eccentric load and determining the optimal arrangement

تعداد لایه‌های کپسول بهبود چشمگیری در عملکرد خاک داشته است که سبب افزایش نسبت ظرفیت باربری خاک شده است. همانطور که در « شکل ۱۶» مشاهده می‌شود با افزایش فاصله کپسول‌ها از تراز زیر کف پی و از همدیگر زاویه شیب نمودار در لایه‌های متفاوت کپسول (یک لایه، دو لایه و سه لایه) کاهش می‌یابد. این امر بیان کننده آن است که با افزایش فاصله از تراز کف پی و با افزایش فاصله کپسول‌ها از یکدیگر در فاصله‌های $B/1$ تا $B/3$ نسبت ظرفیت باربری کاهش می‌یابد (یعنی هر چقدر فاصله کپسول‌ها از کف پی و از یکدیگر از فاصله $B/1$ به فاصله $B/3$ دورتر می‌شوند BCR_2 کاهش می‌یابد). نتیجه این کاهش نسبت ظرفیت باربری با تک لایه کپسول ژئوگرید برابر $21/4$ درصد، در حالت دو لایه کپسول ژئوگرید برابر $37/7$ درصد و در نهایت در حالت سه لایه کپسول ژئوگرید برابر $37/7$ درصد کاهش می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان به این نتیجه رسید که در این تحقیق بهترین فاصله قرارگیری کپسول از زیر کف پی و از یکدیگر در فاصله $B/1$ با سه لایه کپسول ژئوگرید می‌باشد.

۱۰- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی یک پی نواری با نرم افزار المان محدود PLAXIS 2D بر روی یک خاک ماسه‌ای و با استفاده از لایه مسلح کننده کپسول ژئوگرید بیانگر این است که قرار دادن این مسلح کننده در خاک مذکور با توجه به ساختار و شکل خود تامین محصور شدگی لازم برای خاک داخل کپسول به نحو قابل ملاحظه‌ای ظرفیت باربری را بهبود می‌بخشد. در این بررسی به طور خلاصه نتایج زیر به دست آمد:

۱- برای به دست آوردن بیشترین منفعت حاصل از قرار دادن لایه کپسول ژئوگرید در بستر خاک طبق نتایج حاصل از تحلیل‌ها باید فاصله بالای کپسول از زیر پی به اندازه $B/1$ یعنی $(\frac{u}{B}=0.33)$ باشد. اگر این عمق بیشتر گردد ناحیه خاک واقع بر روی لایه کپسول تا سطح پی می‌تواند گسترش جانبی داشته باشد و باعث ایجاد تنش‌های بزرگتری شود. در چنین حالتی کل ظرفیت بالقوه لایه کپسول مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و عملکرد آن کاهش می‌یابد.

۲- تبدیل عملکرد لایه مسلح کننده کپسول ژئوگرید با افزایش عرض بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند زیرا با افزایش عرض کپسول از توسعه سطح گسیختگی جلوگیری می‌شود و در صورت ایجاد گسیختگی، گسیختگی پانچ به گسیختگی کلی تبدیل می‌شود همچنین بارهای وارد بر آن در یک ناحیه گسترده‌تر توزیع می‌شود. در این تحقیق عرض کپسول برابر با $B/4$

- [9] A. Afshar Farnia, & V. Rostami, The Evaluation of Footing Bearing Capacity Rest on Top of Retaining Wall Reinforced by Geogrid in Saturated and Dry Soil, Omran Sharif J. Civil Eng, 17(6), 1397. (in Persian)
- [10] J. Sadeghi, A. R. Tolou Kian, H. Ghiasinejad, M. Fallah Moqaddam, & S. Motevalli, Effectiveness of geogrid reinforcement in improvement of mechanical behavior of sand-contaminated ballast, Geotextiles and Geomembranes, 48, 2020, 768-779.
- [11] G. Gill, & R. K. Mittal, Sustainable application of waste tire chips and geogrid for improving load carrying capacity of granular soils, Journal of Cleaner Production, 200, 2018, 542-551.
- [12] X. Chen, J. Zhang, & Z. Li, Shear behaviour of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale triaxial tests, Geotextiles and Geomembranes, 42, 2014, 312-328.
- [13] S. K. Shukla, & M. N. A. Raja, Ultimate bearing capacity of strip footing resting on soil bed strengthened by wraparound geosynthetic reinforcement technique, Geotextiles and Geomembranes, 48, 2020, 867-874.
- [14] B. Das, Principles of Foundation Engineering, Boston: Kent Publishing Company, 1984.
- of reinforcing layers, Amirkabir J. Civil Eng, 52(12), 1399, 3109-3124. (in Persian)
- [4] A. Hooshyar, & V. Rostami, Granular soil bearing capacity improvement using waste plastic materials, Amirkabir J. Civil Eng, 50(4), 1397, 755-764. (in Persian)
- [5] A. Tabaroei, S. Abrishami, E. Seyedi Hosseininia, & N. Ganjian, Laboratory study of bearing capacity of circular foundation located on the surface of granular soil reinforced with geogrid, Bulletin of Earthquake Science and Engineering, 5(3), 1397. (in Persian)
- [6] A. Ouria, S. Emami, & S. Karamzadegan, Laboratory investigation of the effect of the cement treatment of the interface and the thicknesses of reinforcement on its pull-out capacity, Amirkabir J. Civil Eng, 52(11), 1399, 1-15. (in Persian)
- [7] M. Esmacili, M. Rozbini, & S. Sorani, Laboratory investigation of the effect of geocell on the bearing capacity of railway fines, Omran Sharif J. Civil Eng, 2-35(2/1), 1398, 51-63. (in Persian)
- [8] M. Abbasian, & A. Lakirouhani, Investigation of soil-geogrid interface in direct shear test, with emphasis on the size of apertures of geogrid and different compaction degrees of soil, Amirkabir J. Civil Eng, 50(5), 1397, 949-960. (in Persian)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. A. H. Razavi Mehr, V. Rostami, *The Impact of Using Geogrid Capsules on The Bearing Capacity of Strip Foundations in Sandy Soils*, Amirkabir J. Civil Eng., 57(2) (2025) 341-362.

DOI: [10.22060/ceej.2025.22429.7971](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.22429.7971)



