

Numerical and Practical Analysis of the Uplift Behavior of Plate Anchors in Reinforced Soils: Optimization of Bearing Capacity

Seyed-Shahaboddin Shariati¹, Danial Moazzami¹, Abdollah Tabaroei² , Arash Mahmoudi³ 

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

² Department of Civil Engineering, Eshragh Institute of Higher Education, Bojnourd, Iran.

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Review History:

Received: Sep. 24, 2025

Revised: Dec. 07, 2025

Accepted: Jan. 17, 2026

Available Online: Jan. 30, 2026

Keywords:

Reinforced Soil

Geocell

Geogrid

Uplift Force

Bearing Capacity

ABSTRACT: This study investigates the influence of geocells and geogrids on the bearing capacity of soil subjected to plate anchor uplift loads using three-dimensional modeling in ABAQUS. A series of scenarios were analyzed, including variations in the number and spacing of geocell layers, the placement of the geogrid, the cell height of the geocell, the number of loading zones, and the eccentricity of the geocell. For this purpose, first, two numerical models built in the unreinforced and geocell-armored states, which were built in ABAQUS software, were compared and validated with the results obtained from physical modeling, and then a parametric study was conducted on important design parameters. The findings reveal that the inclusion of two geocell layers can enhance the bearing capacity by up to 30%, whereas wider spacing between the layers reduces this improvement. Incorporating a geogrid at its optimal position beneath the geocell increased the capacity by as much as 39%. Adjusting the cell height of the geocell led to a capacity variation of approximately $\pm 13\%$. Moreover, doubling the number of loading zones from one to two resulted in a remarkable improvement of nearly 200%, while increasing the geocell eccentricity further enhanced the capacity by about 28%. Overall, the results highlight that the strategic selection of geocell-geogrid configurations and dimensions can markedly improve plate anchor performance, offering an effective technique for advanced geotechnical design. The results of this study can shed light on hidden aspects in the design of reinforced soil systems.

1- Introduction

One of the most key findings and discoveries in geotechnical engineering science is the manufacture and use of various types of geosynthetics to improve the strength parameters and relative coverage of soil weakness in tension, in the last few decades. Anchors are structures used to resist upward tensile forces in footings and foundations. Horizontal plate anchors are very common in geotechnical engineering, including at the base of transmission towers, high-rise structures, retaining bridge tension cables, and marine structures that are subject to uplift forces. The bearing capacity of a plate anchor depends on several factors, including the density of the soil around the anchor, the depth of burial, and the dimensions and shape of the anchor [1]. The aim of the current study is to investigate the effect of the presence of geocell and geogrid on increasing the bearing capacity of a plate anchor buried in sand, the role of the height of the geocell layer in improving the bearing capacity ratio, and the consequences of the eccentricity of this layer on the system efficiency and the concentration of deformations using a numerical method [2]. The distinguishing feature of this research is the

simultaneous use of geocell and geogrid reinforcement in a horizontal plate anchor system under uplift force, along with accurate 3D modeling and systematic analysis of variables affecting the ultimate bearing capacity. Thus, the composite behavior of reinforced soil with a combination of geocell and geogrid and their synergy have been evaluated. Also, instead of focusing only on the geocell dimensions or height, a set of less studied parameters, including the distance between geocell layers, the relative position of the geogrid (above or below the geocell), loading in two separate areas, and the effect of eccentricity of the reinforcement placement, were analyzed in a multivariate parametric study. Additionally, using 3D results including stress and displacement contours, the failure mechanism, active stress zones, and the propagation of the failure surface in the presence of the geocell-geogrid composite were identified and based on these, relationships have been presented to suggest the optimal layer spacing, appropriate geogrid depth, and the effect of eccentricity on the reaction capacity, which can be considered as a primary basis for the design of reinforced plate anchors in granular soils.

*Corresponding author's email: a.tabaroei@eshragh.ac.ir

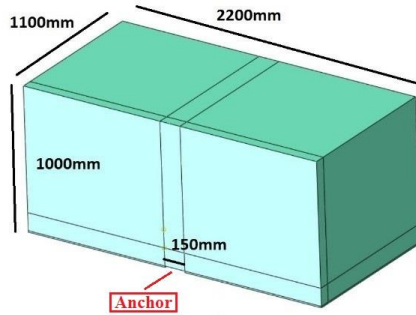


Fig. 1. Soil mass geometry.

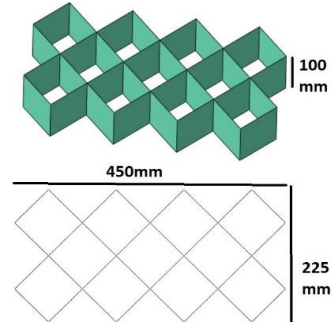


Fig. 2. Geocell layer geometry.

2- Methodology

In this study, ABAQUS 6.14 was used for 3D numerical modeling, which included a horizontal plate anchor buried in the center of a sandy soil mass, along with two types of geosynthetics (geocell and geogrid) in different configurations. According to the reference study [3], the dimensions of the soil mass were 2200×2200×1000 mm, a plate anchor with dimensions of 150×150 and a thickness of 4.25 mm at a depth of 900 mm from the soil surface (Figure 1), and a geocell layer with pocket dimensions of 110×110×100 mm (Figure 2).

In the reference study [3], the dimensions of the plate anchor B, the width of the geocell layer b, and the distance of the geocell from the soil surface were considered equal to D, and laboratory tests were conducted for different D/B ratios. In the current study, the model was simulated in ABAQUS with ratios of D/B=2 and b/B=3. In other words, the distance of the geocell from the soil surface was considered as D=300 and the total width of the geocell layer was considered as b=450 mm. In this study, only soil and geocell were simulated, and the anchor was removed, and instead, the effect of a plate anchor and its location on the soil were created, and the resulting displacement was applied to the model. The modeled soil was uniform sand with an elastoplastic behavior model with the Mohr-Coulomb failure criterion. Based on the reference study [3], the soil internal friction angle (ϕ) was selected as 40.5 degrees, the dilatancy angle (Ψ) was 10 degrees, the modulus of elasticity E was 70 MPa, and the unit weight of sand (γ) was 19.72 kN/m³. The engineering properties of the geocell are also given in Table 1. The geocell used in the reference research was made of a nonwoven polymeric geotextile [4].

The plate anchor was modeled as a square rigid plate with width B. The thickness of the restraint was assumed to be negligible compared to its dimensions, so that the restraint effectively acts as a 2D rigid element. The dimensions of the numerical model were considered large enough to minimize the boundary effect. Specifically, the soil was defined as a cube with lateral dimensions greater than 5 times the width of the anchor (5B) on each side, and boundary conditions including clamping the model bottom (no movement in all

Table 1. The engineering properties of the geotextile.

Description	Value
Type of geotextile	Non-woven
Material	Polypropylene
Area weight (g/cm ²)	190
Thickness under 2 kPa load (mm)	0.57
Thickness under 200 kPa load (mm)	0.47
Tensile strength (kN/m)	13.1
Strength at 5% (kN/m)	5.7
Effective opening size (mm)	0.08

directions) and lateral restraint around the model (in the x and y directions) were applied. These boundary conditions prevented soil from escaping or moving around the model environment, creating conditions similar to a semi-infinite soil environment. Also, a 20 mm displacement resulting from the displacement of the anchor plate in the z direction, which was transferred to the plate anchor by the jack in the laboratory model, was applied to its location. The mesh type used for the geocell was S4R and the mesh used for the soil was C3D8P. Following the modeling and after ensuring the accuracy of the 3D numerical model, an extensive numerical parametric study was conducted. The numerical models include 22 models that are divided into five main groups. The five main groups are as follows:

Group 1: Investigating the effect of the distance between two geocells relative to each other;

Group 2: Investigating the effect of the distance between the geogrids placed above and below the geocell;

Group 3: Investigating the effect of changing the height of the geocell pockets;

Group 4: Investigating the change in the loading location

from one area to two areas;

Group 5: Investigating the effect of the geocell's eccentricity relative to the area of application of the reaction load.

3- Result and Discussion

In the first group, another layer of geocell was placed at intervals of 5, 10, 15, 20, and 25 cm below the geocell of the base model. By adding a layer of geocell at specific distances from each other, the bearing capacity increases compared to the base model, which has a bearing capacity of 2300 N. Placing two geocell layers close together is most effective. As the distance increases, the effectiveness decreases uniformly, and as the distance between the geocell layers increases, the advantage of having two geocells is minimized.

In the second group, a geogrid layer was added to the basic model, which was placed above and below the geocell at different distances, respectively. Despite the fact that the geogrid is placed at a lower depth than the geocell, the trend of changes in its bearing capacity increases and reaches from 19.5% to 39.1%. As the distance of the geogrid from the geocell increases upwards, the trend of changes in bearing capacity decreases; so that at a distance of 15 cm from the top of the geogrid to the top of the geocell, only a 2.2% increase in bearing capacity is observed.

In the third group, in the basic model, the height of the geocell pocket is 10 cm. In the third group, pocket heights of 5 and 15 cm were investigated. The results showed that increasing the pocket height leads to an increase in the bearing capacity of the plate reinforcement.

In the fourth group, the loading area was changed from one 150×150 mm plate to two 150×150 mm plates with a distance of 150 mm. Numerical analysis of this case showed that the bearing capacity of the plate anchor increased from 2300 N in the base model to 7000 N, which represents an increase of more than 204% in bearing capacity.

In the fifth group, the eccentricity of the geocell layer at distances of 5, 10, 15, 20, and 25 cm from the center of the soil mass, where the uplift force is applied, was analyzed and investigated. The eccentricity of the geocell relative to the loading location has a positive effect on the bearing capacity of the plate restraint. As the geocell's eccentricity increases relative to the point of application of the uplift force, the efficiency also increases; so that the bearing capacity at an eccentricity of 25 cm has increased by about 30% compared to the basic model.

In Figure 3, the results obtained from numerical analyses in terms of the bearing capacity improvement ratio of the loading plate against the normalized and dimensionless parameters relative to the width of the anchor in the current study are presented, and as can be seen, in most cases the parameters studied have increased the bearing capacity of the plate. In Figure 3, s/B is the ratio of the distance between two geocells to the width of the reinforcement, h/B is the ratio of the pocket height to the width of the anchor, e/B is the ratio of the eccentricity distance to the width of the anchor, $z1/B$ is the ratio of the vertical distance of the geogrid position at the

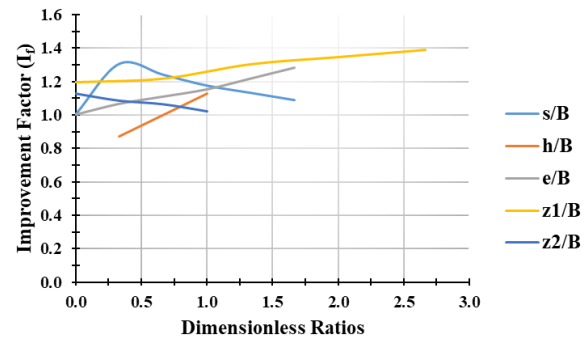


Fig. 3. Diagram of bearing capacity improvement ratio against normalized parameters.

bottom of the geocell to the width of the anchor, and $z2/B$ is the ratio of the vertical distance of the geogrid position at the top of the geocell to the width of the anchor.

4- Conclusion

The main findings show an increase in bearing capacity of up to 30% with two geocell layers close together, up to 39% with the incorporation of a geogrid in the lower geocell position, 13% with increasing the pocket height, 204% with two-zone loading, and up to 28% with geocell eccentricity. These improvements are mainly due to 3D confinement, stress distribution, and expansion of the failure surface, which confirms the effectiveness of geosynthetics as an economical solution in geotechnical projects.

- 1- The role of various geosynthetics: Not only does reinforcing the soil with a geocell layer significantly increase the tensile capacity of the plate reinforcement; but adding an additional geocell layer also causes a very significant increase in the bearing capacity of the reinforcement. The combined use of geocell and geogrid is also better than using either type of geosynthetic alone; so that if the geogrid is placed under the geocell, it will have the greatest effect in limiting lateral deformations and increasing bearing capacity;
- 2- Effect of the placement of the reinforcing layer: The location of the geogrid in the soil-anchor-geosynthetic system is important. The results showed that geogrids in contact with the geocell layer or closer to it, if placed below the geocell layer, are much more effective than when placed above the geocell layer;
- 3- Dimensions and eccentricity: Geocells with higher pocket heights increase the bearing capacity due to the increased volume of the soil mass involved in yielding and greater interaction between the soil and the geocell. Also, the eccentricity of the geocell relative to the uplift force application area and the use of two load application areas increases the bearing capacity.

References

- [1] A.K. Choudhary, S.K. Dash, Uplift behaviour of horizontal plate anchors embedded in geocell-reinforced sand, in: Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Roorke, India, 2013.
- [2] S.S. Shariati, Numerical study of the uplift behaviour of plate anchor in reinforced soil, Master of science thesis, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, 2022. (In Persian)
- [3] M. Rahimi, S.N. Moghaddas Tafreshi, B. Leshchinsky, A.R. Dawson, Experimental and numerical investigation of the uplift capacity of plate anchors in geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6) (2018) 801–816.
- [4] S.N. Moghaddas Tafreshi, A.R. Dawson, A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 32 (2012) 55–68.



تحلیل عددی و کاربردی رفتار برکنش مهار صفحه‌ای در خاک مسلح: بهینه‌سازی ظرفیت باربری

سیدشهاب‌الدین شریعتی^۱، دانیال معظمی^۲، عبدالله تبرئی^{۳*}، آرش محمودی^۴

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی اشراق، بجنورد، ایران.

۳- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

کلمات کلیدی:

خاک مسلح

ژئوسل

ژئوگرید

نیروی برکنش

ظرفیت باربری

خلاصه: در این پژوهش، اثر به کارگیری ژئوسل و ژئوگرید بر ظرفیت باربری خاک تحت نیروی برکنش مهار صفحه‌ای با مدل سازی سه‌بعدی در ABAQUS بررسی و سناریوهای مختلف شامل تعداد و فاصله لایه‌های ژئوسل، موقعیت ژئوگرید، ارتفاع پاکت ژئوسل، تعداد نواحی بارگذاری و خروج از مرکز ژئوسل ارزیابی شد. بدین منظور ابتدا دو مدل عددی ساخته شده در حالت‌های غیرمسلح و مسلح به ژئوسل که در نرم افزار ABAQUS ساخته شده بودند با نتایج به‌دست آمده از مدلسازی فیزیکی مقایسه و صحت سنجی شدند و در ادامه مطالعه پارامتریکی بر روی پارامترهای مهم طراحی صورت گرفت. نتایج نشان داد افزودن دو لایه ژئوسل ظرفیت را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش فاصله بین آن‌ها موجب کاهش ظرفیت می‌شود. ترکیب ژئوگرید در موقعیت بهینه زیر ژئوسل ظرفیت را تا ۳۹٪ بهبود داد. تغییر ارتفاع پاکت ژئوسل نیز حدود ۱۳٪ $\pm$ بر ظرفیت مؤثر بود. افزایش تعداد نواحی اعمال بار از یک به دو، بهبود چشم‌گیر حدود ۲۰٪ ایجاد و افزایش خروج از مرکز ژئوسل ظرفیت را تا حدود ۲۸٪ بیشتر کرد. در مجموع، انتخاب مناسب آرایش و ابعاد ژئوسل و ژئوگرید می‌تواند عملکرد مهار صفحه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا دهد و به‌عنوان رویکردی مؤثر در طراحی‌های ژئوتکنیکی به‌کار رود. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند زوایای پنهان موجود در طراحی سیستم‌های خاک مسلح را روشن نماید.

۱- مقدمه

خاک، همواره نقش بسیار مهمی در پیشرفت عمران و آبادانی داشته است؛ بار سازه‌ها در نهایت به زمین منتقل شده و خاک در بررسی عملکرد سازه‌ها در شرایط محیطی مختلف نقش داشته است. یکی از کلیدی‌ترین یافته‌ها و اکتشافات ساخته بشر در علم مهندسی ژئوتکنیک، ساخت و استفاده از انواع مسلح‌کننده‌ها جهت بهبود پارامترهای مقاومتی و پوشش نسبی ضعف خاک در کشش، در چند دهه اخیر است. امروزه از ژئوسنتتیک‌ها که عمدتاً از مواد پلیمری تهیه می‌شوند، در طراحی و اجرا پی ساختمان‌ها، خاکریزها، سازه‌های نگهبان، روسازی راه، زهکشی و موارد مشابه استفاده می‌شود. با گذشت زمان و پژوهش‌ها و بررسی‌های مختلف بر ژئوسنتتیک‌ها، شکل‌های مختلفی از این نوع محصولات به بازار عرضه شده است. ژئوسل یک نوع از انواع ژئوسنتتیک‌ها است که امروزه مطالعات وسیعی روی آن در حال انجام است. یکی از موارد مهم استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در پروژه‌های عمرانی،

استفاده به‌عنوان مسلح‌کننده جهت افزایش ظرفیت باربری پی‌ها است.

مهار^۱ سیستم پی باریکی است که به‌منظور مقاومت در برابر هر نوع نیروی بیرون‌کشی یا گشتاور واژگونی که در سازه قرار گرفته است، طراحی و برای انتقال نیروهای مختلف از سازه به خاک از آن کمک گرفته می‌شود [۱]. مهارها سازه‌هایی هستند که برای مقاومت در برابر نیروهای کششی رو به بالا^۲ در پی‌ها و فونداسیون‌ها نیز به‌کار می‌روند. کاربرد مهارهای صفحه‌ای افقی در مهندسی ژئوتکنیک بسیار رایج است؛ از جمله در پایه دکل‌های انتقال نیرو، سازه‌های بلندمرتبه، مهار کابل‌های کششی پل‌ها و سازه‌های دریایی که در معرض نیروهای برکنشی قرار دارند. ظرفیت باربری برکنشی یک مهار صفحه‌ای به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به دانسیته خاک اطراف مهار، عمق مدفون شدن، ابعاد و شکل مهار اشاره کرد [۲]. مسلح‌سازی خاک با ژئوسنتتیک به دلیل سهولت اجرا،

1. Anchor

2. Uplift Forces

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.tabaroei@eshragh.ac.ir



هزینه مناسب و عملکرد مؤثر، امروزه به عنوان یک روش پرکاربرد در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک مورد توجه قرار گرفته است. هدف از پژوهش کنونی، بررسی تأثیر حضور ژئوسل و ژئوگرید بر افزایش ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای مدفون در ماسه و نقش ارتفاع لایه ژئوسل در بهبود نسبت ظرفیت باربری و پیامدهای ناشی از خروج از مرکزیت این لایه در کارایی سیستم و تمرکز تغییر شکل‌ها به روش عددی است [۳].

پژوهش‌های متعددی در چند دهه اخیر، روش‌های افزایش مقاومت برکنش مهارهای صفحه‌ای در خاک را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک می‌تواند ظرفیت برکنش مهار صفحه‌ای را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. دلیل این امر، بهبود اندرکنش بین مهار و خاک پیرامون به کمک المان‌های تقویت‌کننده است که منجر به گسترش سطح گسیختگی و افزایش مقاومت اصطکاکی می‌شود که در واقع به جای افزایش عمق دفن یا ابعاد مهار که از نظر اقتصادی و اجرایی همواره ممکن نیست، می‌توان با به کارگیری ژئوسنتتیک‌ها در محدوده مهار، ظرفیت برکنش را به صرفه‌تر ارتقا داد [۴].

وجه تمایز این پژوهش در استفاده هم‌زمان از تسلیح ژئوسل و ژئوگرید در سامانه مهار صفحه‌ای افقی تحت نیروی برکنش، همراه با مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق و تحلیل نظام‌مند متغیرهای مؤثر بر ظرفیت نهایی برکنش است. به این ترتیب که رفتار مرکب خاک مسلح‌شده با ترکیب ژئوسل و ژئوگرید و نحوه هم‌افزایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، به جای تمرکز محدود بر ابعاد یا ارتفاع ژئوسل، مجموعه‌ای از پارامترهای کمتر بررسی‌شده شامل فاصله میان لایه‌های ژئوسل، موقعیت نسبی ژئوگرید (در بالا و یا پایین ژئوسل)، بارگذاری در دو ناحیه مجزا و اثر خروج از مرکز جانمایی مسلح‌کننده، در قالب یک مطالعه پارامتریک چندمتغیره تحلیل شده‌اند. به علاوه، با بهره‌گیری از نتایج سه‌بعدی شامل کانتورهای تنش و جابجایی، مکانیزم گسیختگی، نواحی فعال تنش و نحوه گسترش سطح شکست در حضور ترکیب ژئوسل-ژئوگرید شناسایی شده و براساس آن، روابطی برای پیشنهاد فاصله بهینه لایه‌ها، عمق مناسب ژئوگرید و اثر خروج از مرکز بر ظرفیت برکنش ارائه شده است که می‌تواند مبنای اولیه‌ای برای طراحی مهارهای صفحه‌ای مسلح‌شده در خاک‌های دانه‌ای محسوب شود.

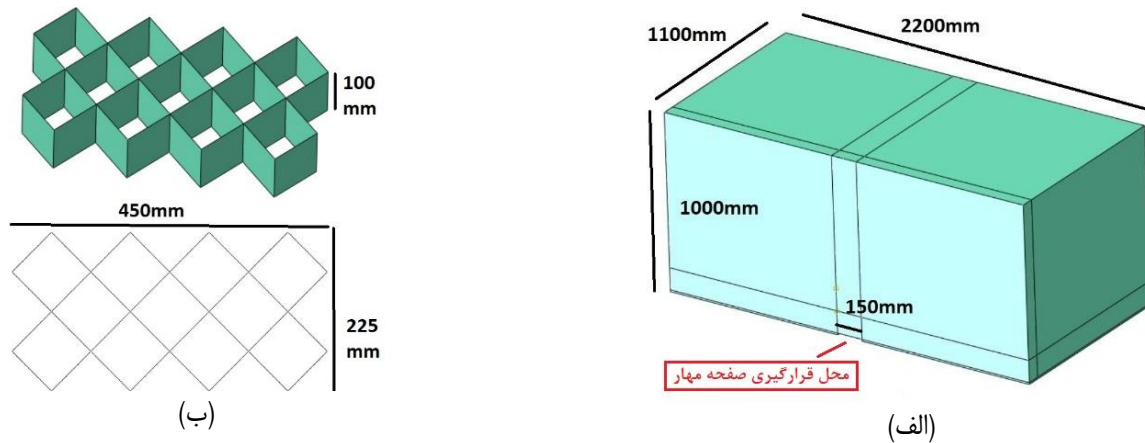
مسلح‌سازی سه‌بعدی خاک به وسیله ژئوسل، در سال‌های اخیر به عنوان راهکاری کارآمد جهت بهبود عملکرد مهارهای صفحه‌ای در برابر برکنش مورد توجه قرار گرفته است که کاربرد ویژه‌ای در اجرای فونداسیون‌ها، خاکریزها و تثبیت بستر راه دارند. چوداری و دش [۲] و مقدس تفرشی و

همکاران [۵] اثرات ژئوسل بر افزایش ظرفیت کششی مهارها و شمع‌های پافیلی^۱ را بررسی نمودند که هر دو نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی در حضور این نوع مسلح‌کننده‌ها بودند [۴]. همچنین ظرفیت برکنشی انکر صفحه‌ای در ماسه با چهار نسبت عمق مدفون‌شدگی مختلف ($L/D = ۱, ۲, ۳$ و ۴) و تراکم‌های متفاوت ماسه بررسی شد و عملکرد انواع تسلیح از جمله ژئوگرید تک لایه، ژئوگرید دو لایه، ژئوسل و ژئوسل همراه با ژئوگرید پایه مقایسه شد. استفاده از ژئوسل، به ویژه در بالای انکر، بیشترین بهبود ظرفیت برکنش را ایجاد کرد و سبب گسترش ناحیه گسیختگی مخروطی شکل شد. همچنین رابطه هیپربولیک تنش- کرنش توانست رفتار بار-جابجایی را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند [۶]. دش و چوداری [۷] در آزمایش‌های خود روی مهارهای صفحه‌ای عمودی نشان داد که افزودن یک لایه ژئوسل در اطراف مهار می‌تواند جابجایی‌های بزرگی معادل ۶۰ تا ۷۰ درصد ارتفاع خود را تحمل کند؛ در حالی که ظرفیت باربری آن نسبت به حالت بدون تسلیح چهار برابر شده بود. این پژوهش همچنین ابعاد بهینه ژئوسل را جهت به دست آوردن بیشترین بهره‌وری مشخص کرد (طول، عرض و ارتفاع ژئوسل به ترتیب حدود ۵، ۳ و ۲/۸ برابر ارتفاع مهار) و نشان داد که برای عملکرد مطلوب، اندازه چشمه‌های ژئوسل باید هم‌مقیاس با ابعاد مهار انتخاب شود. در پژوهش دیگری با استفاده از تحلیل عددی سه‌بعدی مشاهده شد که استفاده از ژئوسل می‌تواند ظرفیت برکنش مهار صفحه‌ای افقی را براساس هندسه و عمق مدفون‌شدگی تا چندین برابر حالت غیرمسلح افزایش دهد. همچنین افزایش ارتفاع پاکت ژئوسل و کاهش فاصله آن از مهار، بیشترین تأثیر را در تقویت سازوکار مقاومتی خاک داشت [۸]. به‌طور مشابه، در پژوهش دیگری از طریق آزمایش در مقیاس تقریباً کامل و تحلیل المان محدود گزارش شد که قرارگیری ژئوسل در بالای مهار سبب افزایش مقاومت برکنش می‌شود. همچنین نشان داده شد که قرار دادن لایه ژئوسل مستقیماً روی مهار، سبب افزایش ۳۰ تا ۵۵ درصدی نیروی برکنش نسبت به حالت بدون تسلیح می‌شود؛ هرچند که با بزرگ‌تر شدن ابعاد مهار یا افزایش عمق دفن، میزان بهره‌مندی از ژئوسل تا حدودی کاهش می‌یابد [۴]. در مطالعه سه‌بعدی عددی، رفتار مهار صفحه‌ای افقی در ماسه مسلح‌شده با ژئوسل تحلیل و مشخص شد که تحت شرایط هندسی بهینه، ژئوسل می‌تواند ظرفیت برکنش را بیش از ۵۰٪ افزایش دهد. بیشترین کارایی زمانی مشاهده شد که ژئوسل دقیقاً در بالای مهار قرار گیرد و افزایش عرض ژئوسل (بیش از ۳/۴۶ برابر عرض مهار) تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت نداشت. همچنین افزایش ارتفاع ژئوسل ظرفیت

را به صورت خطی افزایش داد، در حالی که سختی ژئوسل بیشتر بر کنترل کرنش موثر بود تا مقاومت نهایی [۹]. در مطالعه‌ای که مهارهای مسلح به ژئوسل تحت بارگذاری سیکلی بررسی شدند، مشاهده شد که حضور ژئوسل علاوه بر افزایش ظرفیت برکنش استاتیکی، از وقوع گسیختگی پیش‌رونده ناگهانی تحت بارگذاری‌های متناوب جلوگیری می‌کند و پایداری مهار پس از چرخه‌های بارگذاری را نیز افزایش می‌دهد [۱۰]. در طی انجام آزمایش‌های مقیاس کوچک برای ارزیابی اثرات نسبت جای‌گیری مهار، نسبت عرض و ارتفاع ژئوسل و شکل هندسی مهارها بر رفتار برکنش مهارهای صفحه‌ای افقی کم‌عمق مسلح‌شده در خاک غیرچسبنده، نشان داده شد که استفاده از ژئوسل در اطراف مهار کم‌عمق، سبب افزایش ظرفیت برکنش می‌شود [۱۱]. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که تقویت انکر قائم با ژئوسل سبب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری برکنشی می‌شود و سطح گسیختگی از لبه تحتانی ژئوسل به صورت منحنی تا سطح خاک گسترش می‌یابد. همچنین مشخص شد که ابعاد ژئوسل (طول، عرض و ارتفاع مناسب) و اندازه پاکت، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری سطح گسیختگی و افزایش ظرفیت باربری دارند و بیش از حد بزرگ بودن پاکت موجب کاهش کارایی در کنترل گسیختگی می‌شود [۱۲]. بنابراین، به کارگیری ژئوسل (با ابعاد و موقعیت بهینه‌شده) می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر جهت بهبود عملکرد مهارهای صفحه‌ای در پروژه‌های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد استفاده توأمان از ژئوسل و انواع دیگر ژئوسنتتیک، سبب بهبود ظرفیت برکنش مهارهای صفحه‌ای می‌شوند. به عنوان مثال در یک پژوهش آزمایشگاهی، رفتار انکر صفحه‌ای افقی کم‌عمق در شرایط مختلف شامل تغییر عمق مدفون‌شدگی، قطر صفحه، نوع خاک و استفاده از ژئوسل و ژئوتکستایل بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش عمق و قطر صفحه، ظرفیت برکنش را به طور محسوسی افزایش می‌دهد و حضور ژئوسل و ژئوتکستایل موجب تغییر کامل شکل منحنی بار-جابجایی و افزایش قابل توجه مقاومت برکنشی می‌شود. همچنین ترکیب همزمان ژئوسل و ژئوتکستایل بیشترین بهبود عملکرد را ایجاد کرد [۱۳]. در پژوهش آزمایشگاهی، برای کنترل برکنش لوله، استفاده از ژئوسل و ترکیب ژئوسل با ژئوتکستایل بررسی شد. نتایج نشان داد ژئوسل ظرفیت مقاومتی را در لحظه پیک بیش از ۱/۵ برابر و در جابجایی بزرگ تا ۳ برابر نسبت به حالت غیرمسلح افزایش می‌دهد. همچنین ترکیب ژئوسل و ژئوتکستایل و افزایش تعداد لایه‌ها در اطراف لوله، کاراترین حالت تقویت و بیشترین مقاومت برکنشی را ایجاد نمود [۱۴].

همچنین نتایج نشان داده‌اند که تسلیح خاک با ژئوگرید نیز به طور مؤثری ظرفیت برکنش مهارهای صفحه‌ای را افزایش می‌دهد. همچنین طی آزمایش‌های مدل فیزیکی و شبیه‌سازی عددی، گزارش شد که افزودن لایه ژئوگرید موجب افزایش قابل توجه ظرفیت برکنش مهار صفحه‌ای در ماسه می‌شود و مقدار آن به عمق دفن مهار و دانسیته نسبی خاک وابسته است [۱۵]. تأثیر شکل هندسی مهار، زاویه اعمال بار و موقعیت ژئوگرید بر عملکرد مهارهای صفحه‌ای مایل در ماسه در یک پژوهش آزمایشگاهی- عددی بررسی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از ژئوگرید در بالای مهار مایل، ظرفیت برکنش را به طور قابل توجهی افزایش داده و افزایش زاویه مهار (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) موجب بهبود عملکرد شده و مشخص شد که عمق مدفون‌شدگی مهار و دانسیته نسبی ماسه بیشترین تأثیر را بر ظرفیت برکنش دارند. تحلیل عددی با نرم‌افزار FLAC 3D و مقایسه رفتار فونداسیون‌های مهار و شمع برای یک دکل انتقال نیرو نشان داد که مهارهای مایل مسلح‌شده با ژئوگرید می‌توانند در عمق کم، عملکردی مشابه یا حتی بهتر از شمع‌ها در مقاومت در برابر نیروهای برکنش ارائه دهند. [۱۶]. در یک پژوهش آزمایشگاهی، با استفاده از دستگاه کشش مایل در مقیاس بزرگ روی ژئوسنتتیک ورقه‌ای (ساخته شده از نوارهای ژئوگرید) و ژئوگرید تعبیه شده در مهارهای خارج از محور I-شکل و L-شکل، استنباط شد که نوع مسلح‌کننده (صفحه‌ای در برابر شبکه‌ای) و جای‌گذاری آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیزم گسیختگی و ظرفیت کششی مهار دارند و هم در ژئوسنتتیک ورقه‌ای و هم در ژئوگرید، مهار I-شکل تقریباً ۵۰٪ و مهار L-شکل تقریباً ۹۰٪ نیروی کشش بیشتری نسبت به مهار خارج از محور ایجاد می‌کند. با افزایش شیب نیروی کشش از صفر درجه به ۳۰ درجه برای ژئوسنتتیک ورقه‌ای و ژئوگرید، حداکثر نیروی کشش بیش از ۲۰٪ افزایش می‌یابد [۱۷]. در یک پژوهش ساتریفیوژی و عددی، ظرفیت برکنشی انکر نواری در ماسه مسلح‌شده با ژئوگرید در آرایش‌های مختلف بررسی و مشخص شد که قرارگیری یک لایه ژئوگرید با زاویه ۴۵ درجه در بالای مهار، تا حدود ۹۸٪ ظرفیت برکنش را نسبت به حالت غیرمسلح افزایش می‌دهد که کاراتر از آرایش‌های افقی و عمودی است. پژوهشگران در ادامه با هدف ارائه روشی اقتصادی و بدون افزایش عمق مدفون‌شدگی، نشان دادند که بهترین نحوه جای‌گذاری ژئوگرید، قرارگیری آن مستقیماً در بالای مهار و با زاویه شیب ۴۵ درجه است؛ به طوری که نه تنها موجب بهبود قابل توجه ظرفیت برکنشی می‌شود، بلکه نقش مؤثری در کاهش هزینه‌های اجرایی نسبت به سایر آرایش‌های تسلیح نیز دارد [۱۸]. در پژوهشی با بهره‌گیری از آزمون‌های



شکل ۱. هندسه مدل منطبق بر پژوهش مرجع ([۴]) جهت صحت‌سنجی در نرم‌افزار ABAQUS: الف) هندسه توده خاک؛ ب) هندسه لایه ژئوسل

Fig. 1. Model geometry according to reference research ([4]) for validation in ABAQUS software: a) Soil mass geometry; b) Geocell layer geometry

در مرکز یک توده خاک ماسه‌ای، به همراه تسلیح ژئوستتیک (ژئوسل و ژئوگرید) در پیکربندی‌های مختلف بود. شکل کلی مدل و نحوه قرارگیری عناصر مسلح‌کننده به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. سیستم خاک-مهار-ژئوستتیک مدل شده در پژوهش کنونی، براساس پژوهش رحیمی و همکاران [۴]، مدل‌سازی و بازطراحی شده است که از آن تحت عنوان پژوهش مرجع یاد خواهد شد. طبق پژوهش مرجع [۴]، ابعاد توده خاک $2200 \times 1100 \times 1000$ میلی‌متر، مهار صفحه‌ای به ابعاد 150×150 و به ضخامت $25/4$ میلی‌متر در عمق 900 میلی‌متری از سطح خاک و یک لایه ژئوسل با ابعاد پاکت‌های $110 \times 110 \times 100$ میلی‌متر بود.

در پژوهش مرجع، ابعاد مهار صفحه‌ای B ، عرض لایه ژئوسل b و فاصله ژئوسل از سطح خاک برابر D در نظر گرفته شده و به‌ازای نسبت‌های مختلف D/B ، آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده است؛ به‌طوری‌که نسبت b/B همواره ثابت و برابر ۳ و آزمایش‌ها به‌ازای 900 ، 675 ، و 450 میلی‌متر انجام شد. در پژوهش کنونی، مدل با نسبت‌های $D/B=2$ و $b/B=3$ ، در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شد. به‌عبارت‌دیگر، فاصله ژئوسل از سطح خاک $D=300$ و عرض کل لایه ژئوسل $b=450$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین به‌دلیل تقارن، نیمی از مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی و از قیود تقارنی برای شبیه‌سازی نیمه دیگر مدل استفاده و ژئوسل به صورت قید Embedded Region مدل شد (شکل ۲). شماتیک از مدل ارائه شده در پژوهش مرجع، در شکل ۳ نشان داده شده است.

برکنش همراه با تکنیک PIV^۱ و OFDR^۲ با وضوح بالا، نتیجه شد که دو عامل نسبت عمق دفن مهار و مکان قرارگیری ژئوگرید، بیشترین تأثیر را بر مقاومت برکنش دارند؛ در حالی‌که افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید تأثیر زیادی ندارد. افزایش عمق دفن در حضور ژئوگرید سبب افزایش چشم‌گیر ظرفیت نهایی برکنش و بهبود اندرکنش خاک-ژئوگرید می‌شود و شکل سطح گسیختگی از حالت تقریباً عمودی به شکل حبابی تغییر می‌نماید [۱۹]. در پژوهش عددی سه‌بعدی، رفتار انکر صفحه‌ای افقی بزرگ‌مقیاس در ماسه مسلح با ژئوگرید بررسی و مشخص شد که بیشترین کارایی ژئوگرید زمانی حاصل می‌شود که عرض آن تقریباً سه برابر عرض انکر باشد. همچنین کارایی تقویت با افزایش عرض انکر و افزایش عمق مدفون‌شدگی کاهش می‌یابد و ژئوگرید برای انکرهای کم‌عمق در ماسه سست مؤثرتر است [۲۰]. به‌طور کلی، پژوهش‌های اخیر همگی مؤید آن هستند که استفاده از ژئوگرید (با طراحی بهینه تعداد، طول و موقعیت لایه‌ها) روشی مؤثر برای افزایش مقاومت برکنش مهار صفحه‌ای در خاک‌های دانه‌ای است.

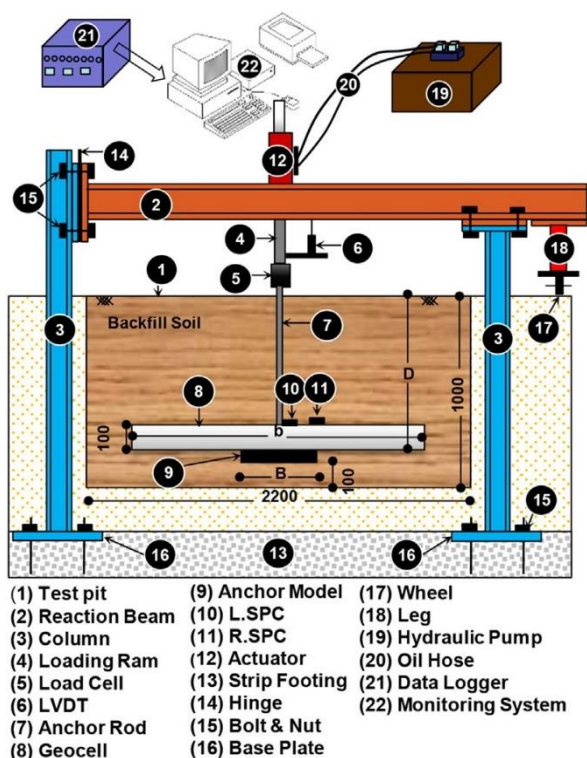
۲- مصالح و روش‌ها

۲-۱- روش‌شناسی مدل‌سازی عددی

۲-۱-۱- هندسه مدل

در این پژوهش جهت مدل‌سازی عددی سه‌بعدی از نرم‌افزار ABAQUS 6.14 استفاده شد که این مدل‌سازی شامل یک مهار صفحه‌ای افقی مدفون

1. Particle Image Velocimetry
2. Optical Frequency Domain Reflectometry



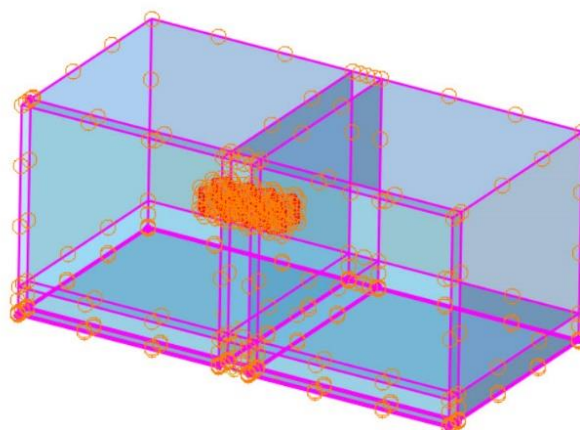
شکل ۳. شماتیک مدل آزمایشگاهی پژوهش مرجع ([۴]).

Fig. 3. Schematic of the reference research laboratory model ([4]).

کششی و سختی اتصال ژئوسل، بیشتر یا مشابه با ماده دیوار ژئوسل (یعنی ژئوتکستایل) است که از پارگی درز جلوگیری می‌کند [۲۱]. همچنین خاک ماسه‌ای به صورت یکنواخت و همگن در نظر گرفته شده است که این فرض براساس شرایط آزمایشگاهی پژوهش مرجع [۴] و کنترل تراکم ($R_d \approx 92\%$) اتخاذ شده است. در شرایط طبیعی و میدانی، ماسه ممکن است از نظر تراکم، رطوبت و دانه‌بندی کاملاً یکنواخت نبوده و این موضوع می‌تواند بر رفتار سیستم و ظرفیت برکنشی تأثیرگذار باشد.

۲-۱-۳- مهار صفحه‌ای

مهار صفحه‌ای به صورت یک صفحه صلب مربعی شکل با عرض B (بعد افقی مهار) مدل‌سازی شد. ضخامت مهار نسبت به ابعاد آن ناچیز فرض شد؛ به‌طوری‌که مهار عملاً به‌صورت یک المان صلب دو بعدی (صفحه‌ای) عمل می‌کند. در بیشتر تحلیل‌ها، عمق مدفون شدن مهار، دو برابر عرض مهار ($D/B=2$) در نظر گرفته شده است که یک عمق مدفون متوسط محسوب می‌شود. این مقدار عمق طوری انتخاب شد که مهار کاملاً در



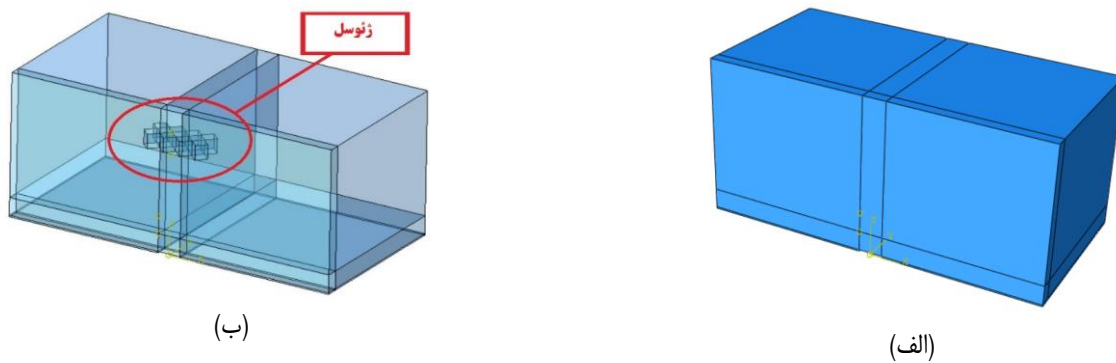
شکل ۲. استفاده از قید Embedded Region در مدل عددی برای تعریف ژئوسل در درون توده خاک

Fig. 2. Using the Embedded Region constraint in the numerical model to define the geocell within the soil mass

در پژوهش کنونی تنها خاک و ژئوسل شبیه‌سازی و انکر حذف و به‌جای آن اثر مهار صفحه‌ای و محل قرارگیری آن روی خاک ایجاد و جابجایی ناشی از آن بر مدل اعمال شد. مدل‌های شبیه‌سازی برای دو حالت غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل در شکل ۴ نشان شده است؛ در حالت غیرمسلح تنها خاک شبیه‌سازی شده و در حالت مسلح، ژئوسل در فاصله ۳۰۰ میلی‌متری از سطح خاک قرار گرفته است.

۲-۱-۲- خواص مکانیکی مصالح

خاک مدل شده، ماسه یکنواخت با مدل رفتاری الاستوپلاستیک با معیار گسیختگی موهر-کولمب انتخاب شد. پارامترهای ماسه و ژئوسل که براساس پژوهش مرجع انتخاب شده، در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. نکته‌های حائز اهمیت آن است که اولاً زاویه اصطکاک داخلی خاک براساس ماسه نسبتاً متراکم پژوهش مرجع [۴] ($\phi=40/5^\circ$) فرض شده است که در نتیجه، مقادیر مطلق ظرفیت برکنشی گزارش شده، برای خاک‌هایی با زاویه اصطکاک کمتر یا شرایط تراکم متفاوت نیازمند تحلیل مجدد با پارامترهای متناظر آن خاک است؛ هرچند می‌توان از روندهای نسبی و الگوهای مشاهده‌شده در پژوهش کنونی، به‌عنوان راهنمایی اولیه برای طراحی در سایر شرایط نیز بهره گرفت و ثانیاً ژئوسل مورد استفاده در آزمایش پژوهش مرجع، از نوعی ژئوتکستایل پلیمری نفاخته ساخته شده که برای ساخت یک ژئوسل بدون سوراخ، با روش حرارتی جوش داده شده بود. طبق گفته سازنده (TDP Limited)، مقاومت



شکل ۴. الگوی مدل برای: (الف) حالت غیر مسلح؛ (ب) حالت مسلح شده با ژئوسل

Fig. 4. Model schematic for: a) unreinforced; b) reinforced with geocell.

جدول ۲. مشخصات مهندسی ژئوتکستایل ([۴]).

Table 2. Geotextile engineering properties ([4]).

مقدار	پارامتر
بافته نشده	نوع ژئوتکستایل
پلی پروپیلن	جنس ژئوتکستایل
۱۹۰	وزن واحد سطح (g/cm^2)
۰/۵۷	ضخامت تحت بار ۲ کیلوپاسکال (mm)
۰/۴۷	ضخامت تحت بار ۲۰۰ کیلوپاسکال (mm)
۱۳/۱	مقاومت کششی (kN/m)
۵/۷	مقاومت در کرنش ۵٪ (kN/m)
۰/۰۸	اندازه بازشدگی مؤثر (mm)

جدول ۱. ویژگی‌های مکانیکی توده خاک مورد استفاده در تحلیل عددی ([۴]).

Table 1. Mechanical properties of soil mass used in numerical analysis ([4]).

مقدار	پارامتر
$40/5^\circ$	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)
10°	زاویه اتساع (ψ)
۷۰ (MPa)	مدول الاستیسیته (E_s)
۰/۳	نسبت پواسون (ν)
۱۹/۷۲ (kN/m^3)	وزن مخصوص خاک (γ)

داخل لایه ماسه قرار گرفته تا از تأثیر سطحی صرف اجتناب شود. دلیل مدل‌سازی مهار صفحه‌ای به صورت یک صفحه صلب، تحلیل رفتار خاک و مکانیزم برکنشی در حضور تسلیحات ژئوستنتیکی است و صرفاً نقش انتقال‌دهنده نیرو را دارد و ظرفیت برکنشی عملاً توسط رفتار خاک کنترل می‌شود. همچنین نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در تحلیل ظرفیت برکنشی، رفتار انکر نسبت به خاک تقریباً صلب است و مدل‌سازی حجمی یا سازه‌ای آن، تأثیر معنی‌داری بر مکانیزم گسیختگی خاک ندارد [۴، ۲۲].

۲-۱-۴- شرایط مرزی

ابعاد حوزه مدل عددی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شد تا اثر مرزی ناخواسته به حداقل برسد. به طور مشخص، دامنه خاک به صورت مکعبی با ابعاد جانبی بیش از ۵ برابر عرض مهار (5B) در هر سمت تعریف و شرایط مرزی شامل گیردار کردن کف مدل (عدم حرکت در تمامی جهات) و مهار

مش C3D8P بوده که یک المان سه‌بعدی هشت گرهی مخصوص خاک و با اندازه ۵ میلی‌متر است که اندازه آن در محل نزدیک به صفحه مهار، ریزتر شده و به مقدار ۱ میلی‌متر رسیده است. شماتیکی از مدل‌های مش‌بندی در شکل ۶ ارائه شده است.

۲-۱-۶- صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

در ابتدا مدل‌ها با نسبت‌های $D/B=2$ و $b/B=3$ در دو حالت غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل جهت صحت‌سنجی مدل عددی با پژوهش مرجع تحلیل شد که فازهای این تحلیل عددی به‌این صورت است:

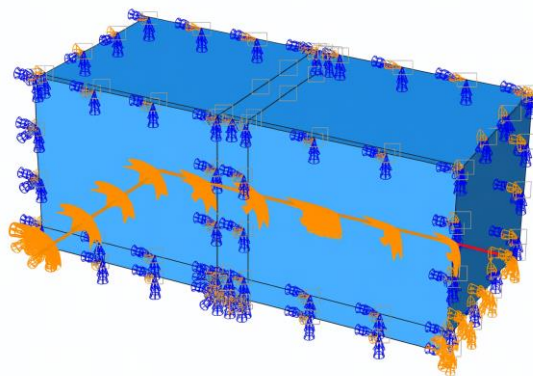
۱- حالت غیرمسلح

نتایج مربوط به نمودار بار-جابجایی با نسبت‌های مختلف D/B در پژوهش مرجع در شکل ۷ و مقایسه آن با نمودار بار-جابجایی به‌دست آمده از تحلیل عددی نرم‌افزار ABAQUS در حالت غیرمسلح در شکل ۸ نشان شده است.

۲- حالت مسلح

نمودار بار-جابجایی پژوهش مرجع و مقایسه آن با نمودارهای بار-جابجایی به‌دست آمده از تحلیل عددی نرم‌افزار ABAQUS در حالت مسلح نیز در شکل ۹ نمایش داده شده است.

همان‌طور که در اشکال ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل عددی ABAQUS تطابق بسیار خوبی با نتایج به‌دست آمده در پژوهش مرجع



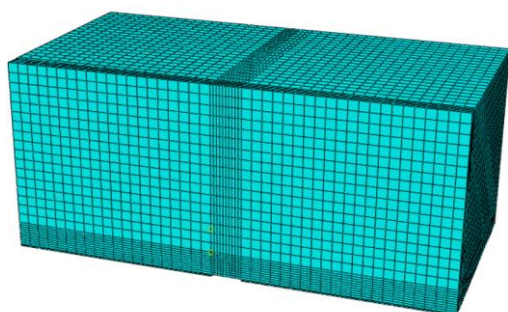
شکل ۵. مقید نمودن کف و مهار جانبی اطراف مدل.

Fig. 5. Floor binding and lateral constraint around the model.

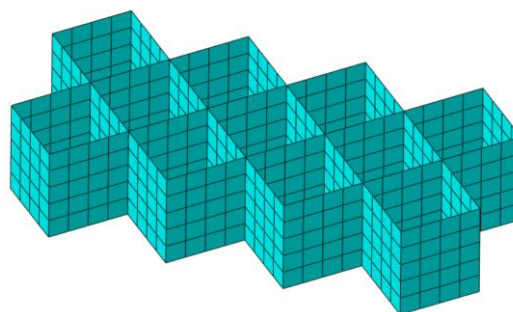
جانبی اطراف مدل (در جهت‌های x و y) اعمال شد که این شرایط مرزی مانع خروج یا جابجایی خاک در اطراف محیط مدل شده و شرایطی شبیه به محیط نیمه‌بی‌نهایت خاک ایجاد می‌کند (شکل ۵). همچنین جابجایی ۲۰ میلی‌متری ناشی از جابجایی صفحه مهار در راستای z که در مدل آزمایشگاهی توسط جک به مهار صفحه‌ای منتقل شده، به محل قرارگیری آن اعمال شده است.

۲-۱-۵- مش‌بندی

نوع مش‌بندی استفاده شده برای ژئوسل، مش S4R است که یک مش پوسته‌ای چهار گرهی با اندازه ۲۰ میلی‌متر و مش به‌کار رفته برای خاک،



(ب)



(الف)

شکل ۶. مدل‌سازی: الف) مش‌بندی لایه ژئوسل با مش S4R؛ ب) مش‌بندی توده خاک با مش C3D8P.

Fig. 6. Model meshing: a) Geocell layer meshing with S4R mesh type; b) Soil mass meshing with C3D8P mesh type.

۲-۲- سناریوهای مدل سازی

در ادامه مدل سازی و بعد از اطمینان از دقت مدل عددی سه بعدی، مطالعه پارامتریک عددی گسترده انجام شد که برنامه آن در جدول ۳ ارائه شده است. مدل های عددی شامل ۲۲ مدل است که در پنج گروه اصلی تقسیم بندی شده اند. پارامترهای خاک، ژئوسل و شرایط مرزی، مشابه مدل عددی پایه (مدل صحت سنجی شده) بوده و هدف از این مدل ها، بررسی عوامل مؤثر بر رفتار مهار صفحه ای در حالت مسلح و ظرفیت باربری مهارهای صفحه ای است. پنج گروه اصلی به این شرح است:

گروه اول: بررسی اثر فاصله دو ژئوسل نسبت به یکدیگر؛

گروه دوم: بررسی اثر فاصله ژئوگرید جانمایی شده در بالا و پایین ژئوسل؛

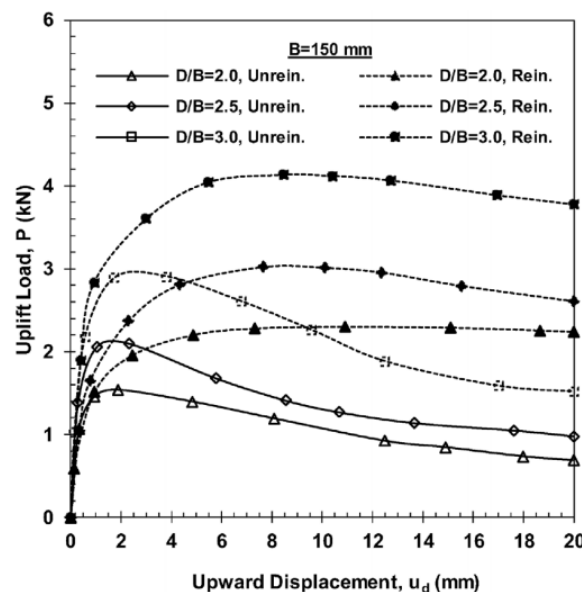
گروه سوم: بررسی اثر تغییر ارتفاع پاکت های ژئوسل؛

گروه چهارم: بررسی تغییر محل بارگذاری از یک ناحیه به دو ناحیه؛

گروه پنجم: بررسی اثر خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به ناحیه اعمال

بار برکنش.

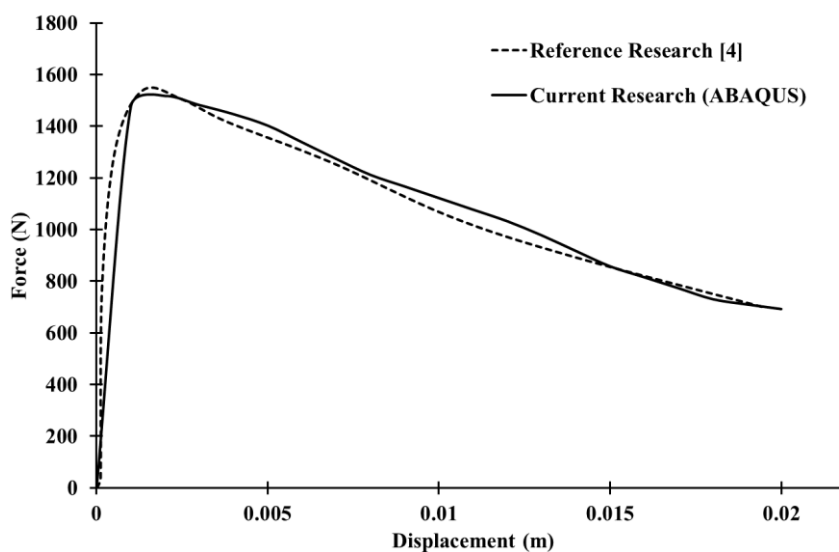
بارگذاری مهار به صورت نیروی کششی استاتیکی اعمال شد. به این منظور، جابجایی کنترل شده ای به صورت حرکت رو به بالا به مرکز مهار اعمال و واکنش نیرویی متناظر در گره های مهار ثبت شد. نرخ جابجایی بارگذاری به اندازه کافی کند انتخاب شد تا حالت شبه استاتیک (زهکشی کامل در خاک ماسه ای) برقرار باشد. منحنی نیرو-جابجایی مهار تا رسیدن به ظرفیت نهایی برکنش (P_u) ادامه یافت؛ به طوری که در این پژوهش معیار



شکل ۷. نمودار نتایج بار-جابجایی در پژوهش مرجع برای حالت های مختلف D/B ([۴]).

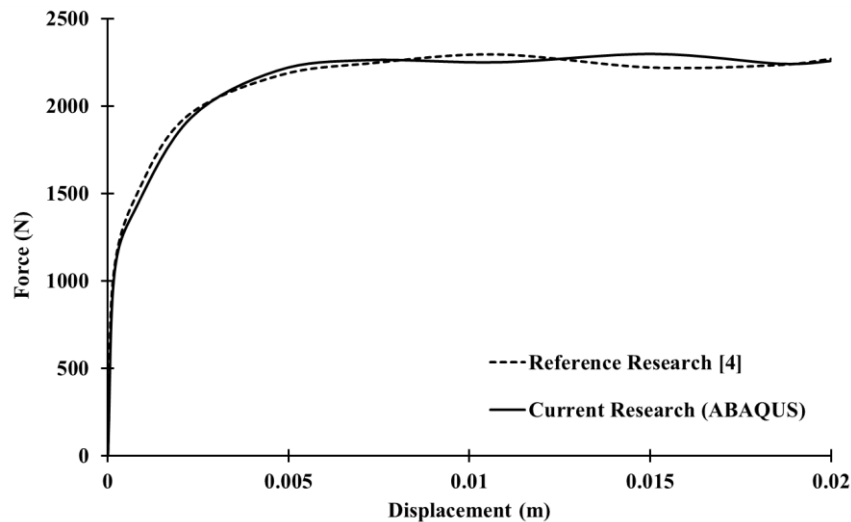
Fig. 7. Load-displacement results diagram in the reference study for different D/B ([4]).

دارد و اختلاف اندک بین نتایج را می توان ناشی از خطای مش بندی دانست که بیانگر دقت بالای مدل عددی سه بعدی پژوهش کنونی است. همچنین در شکل ۱۰، کانتور جابه جایی در راستای (Z) مدل عددی سه بعدی نشان داده شده است.



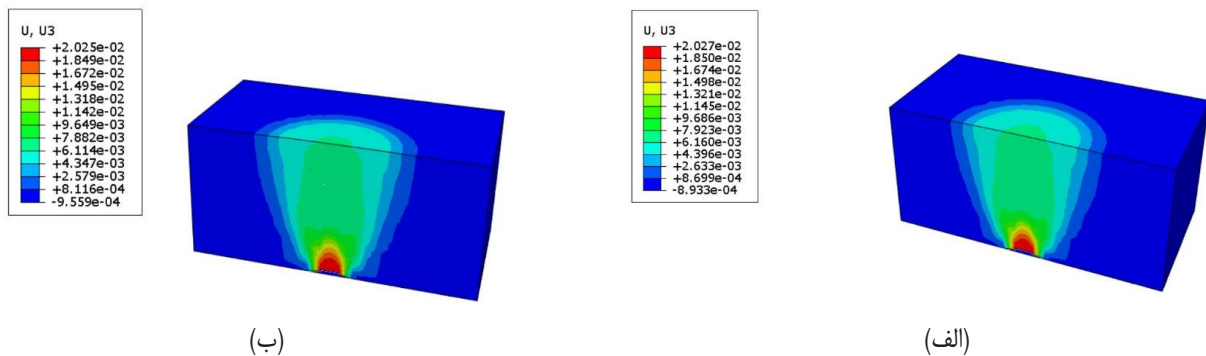
شکل ۸. مقایسه نتایج بار-جابجایی برای حالت غیرمسلح با $D/b=2$ و $b/B=3$.

Fig. 8. Comparison of load-displacement results for the unreinforced state at $D/b=2$ and $b/B=3$.



شکل ۹. مقایسه نتایج بار-جابجایی برای حالت مسلح شده با ژئوسل با نسبت‌های $D/b=2$ و $b/B=3$.

Fig. 9. Comparison of load-displacement results for the reinforced state with geocells at ratios $D/b=2$ and $b/B=3$



شکل ۱۰. کانتور جابه‌جایی قائم به‌دست آمده از نرم افزار ABAQUS: (الف) حالت غیرمسلح؛ (ب) حالت مسلح شده با ژئوسل.

Fig. 10. Vertical displacement contour obtained from ABAQUS software: a) Unreinforced state; b) Geocell reinforced state.

مدل عددی با دولایه ژئوسل که در فاصله ۵ سانتی‌متری از یکدیگر قرار گرفته‌اند و نحوه موقعیت قرارگیری این دو لایه نسبت به یکدیگر در مدل عددی، به‌ترتیب در اشکال ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. با افزودن یک لایه ژئوسل در فواصل مشخص از یکدیگر، ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای نسبت به مدل پایه که ظرفیت باربری آن برابر با ۲۳۰۰ نیوتن است، افزایش می‌یابد. تغییرات ظرفیت باربری مهار با فاصله ژئوسل‌ها نسبت به یکدیگر که در جدول ۴ شرح داده شده است، نسبت عکس دارد. شکل ۱۳ نشان می‌دهد با افزایش فاصله ژئوسل‌ها، مقادیر منحنی بار-جابجایی مدل‌ها تقریباً با یک روند منظم

تعیین ظرفیت نهایی برکنش، رسیدن به جابجایی بزرگ حدود ۲۰ میلی‌متر (کمی بیشتر از ۱۰٪ عرض مهار) است. پس از هر تحلیل، شکل توزیع تغییرمکان و ناحیه تسلیم خاک استخراج و بررسی شد تا مکانیسم گسیختگی مشخص شود.

۳- نتایج و تفسیر

۳-۱- آنالیز گروه اول

در گروه اول، یک لایه ژئوسل دیگر در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر در زیر ژئوسل مدل پایه قرار گرفت. برای نمونه، هندسه

جدول ۳. برنامه مدل‌سازی‌های عددی انجام شده در پژوهش کنونی.

Table 3. Numerical modeling program performed in the current research.

شماره گروه تحلیل	پارامتر مورد بررسی	مقادیر در نظر گرفته شده	تعداد تحلیل‌های عددی
۱	فاصله دو لایه ژئوسل (سانتی‌متر)	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵	۵
۲	فاصله ژئوگرید جانمایی شده در بالا و پایین ژئوسل	ژئوگرید چسبیده به پایین ژئوسل ژئوگرید در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از پایین ژئوسل ژئوگرید در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از پایین ژئوسل ژئوگرید در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از پایین ژئوسل ژئوگرید در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از پایین ژئوسل بدون ژئوگرید (مدل پایه)	۹
۳	ارتفاع پاکت‌های ژئوسل (سانتی‌متر)	۵، ۱۰ (مدل پایه) و ۱۵	۲
۴	تعداد مهار صفحه	۱ (مدل پایه) و ۲	۱
۵	خروج از مرکزیت لایه ژئوسل (سانتی‌متر)	صفر (مدل پایه)، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵	۵

و مشخص کاهش پیدا می‌کند. نمونه‌ای از کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (Z) در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در واقع قرارگیری دو لایه ژئوسل در فاصله نزدیک، بیشترین کارایی را دارد. با افزایش فاصله، کارایی به‌طور یکنواخت کاهش پیدا می‌کند و هرچه فاصله بین لایه‌های ژئوسل بیشتر شود، مزیت حضور دو ژئوسل به حداقل می‌رسد. همچنین با توجه به شکل ۱۴، سطح گسیختگی مدل از حالت نسبتاً عمودی، حبابی شکل شده است.

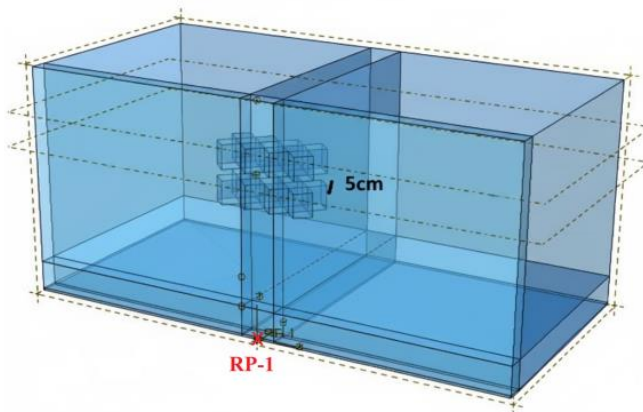
۳-۲- آنالیز گروه دوم

در این گروه، یک لایه ژئوگرید با مشخصات مطابق با جدول ۵ به مدل پایه اضافه شد که به‌ترتیب در بالا و پایین ژئوسل و در فواصل مختلف قرار گرفته است. در این گروه نه مدل تحلیل و نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. نمایی از ژئوگرید قرار گرفته روی ژئوسل در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶ مشاهده می‌شود علیرغم آن‌که

هر چه ژئوگرید در عمق پایین‌تر نسبت به ژئوسل قرار گیرد، روند تغییرات ظرفیت باربری آن صعودی و از ۱۹/۵٪ تا ۳۹/۱٪ می‌رسد؛ با افزایش فاصله ژئوگرید از ژئوسل به‌سمت بالا، روند تغییرات ظرفیت باربری کاهشی است؛ به‌طوری‌که در فاصله ۱۵ سانتی‌متری ژئوگرید از بالای ژئوسل، تنها ۲/۲٪ افزایش ظرفیت باربری مشاهده می‌شود. نمودار بار-جابجایی فاصله‌های مختلف ژئوگرید نسبت به ژئوسل در بالا و پایین آن، در شکل ۱۶ و ۴ مورد از کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (Z) در شکل ۱۷ ارائه شده است.

۳-۳- آنالیز گروه سوم

در مدل پایه، ارتفاع پاکت ژئوسل برابر ۱۰ سانتی‌متر است. در گروه سوم، ارتفاع پاکت‌های ۵ و ۱۵ سانتی‌متری مورد بررسی قرار گرفتند (اشکل ۱۸ و ۱۹). نتایج نشان دادند، افزایش ارتفاع پاکت منجر به افزایش ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای می‌شود. نتایج در جدول ۷ ارائه شده است.



شکل ۱۲. هندسه مدل عددی با دو لایه ژئوسل به فاصله ۵ سانتی متر.

Fig. 12. Numerical model geometry with two geocell layers 5 cm apart.



شکل ۱۱. موقعیت دو ژئوسل نسبت به یکدیگر.

Fig. 11. The position of two geocells relative to each other.

جدول ۴. نتایج گروه اول: بررسی اثر فاصله دو ژئوسل نسبت به یکدیگر.

Table 4. Results of the first group: Effect of the distance between two geocells relative to each other

فاصله دو ژئوسل (سانتی متر)	ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای (نیوتن)	درصد افزایش نسبت به مدل پایه (%)
یک لایه ژئوسل (مدل پایه)	۲۳۰۰	۰
۵	۳۰۰۰	۳۰/۴
۱۰	۲۸۵۰	۲۳/۹
۱۵	۲۷۰۰	۱۷/۴
۲۰	۲۶۰۰	۱۳/۰
۲۵	۲۵۰۰	۸/۷

باربری مهار صفحه‌ای از ۲۳۰۰ نیوتن در مدل پایه به ۷۰۰۰ نیوتن رسیده که نشان‌دهنده افزایش بیش از ۲۰۴ درصدی ظرفیت باربری است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت افزایش تعداد نواحی اعمال بار برکنش سبب افزایش ظرفیت باربری مهارهای صفحه‌ای می‌شود (اشکال ۲۳ و ۲۴).

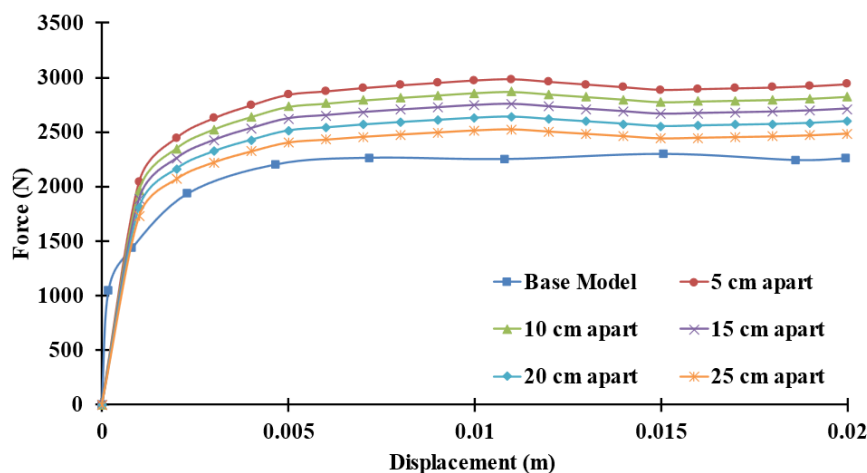
۳-۵- آنالیز گروه پنجم

در گروه پنجم، خروج از مرکزیت لایه ژئوسل در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی متر نسبت به مرکز توده خاک که محل اعمال بار برکنش است،

نمودار بار-جابجایی برای مقادیر مختلف ارتفاع پاکت ژئوسل در شکل ۲۰ و کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (Z) گروه سوم در شکل ۲۱ ارائه شده است.

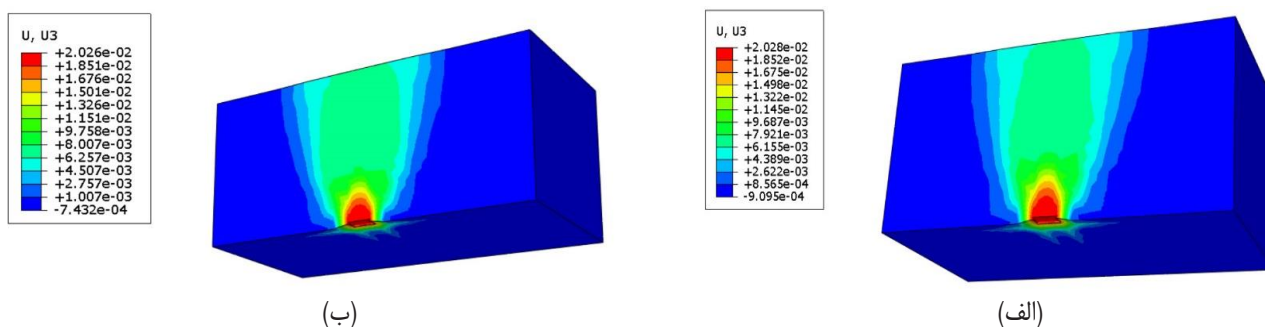
۳-۴- آنالیز گروه چهارم

در گروه چهارم، ناحیه بارگذاری از یک مهار صفحه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر به دو صفحه مهار با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر و فاصله ۱۵۰ میلی‌متر تغییر داده شد (شکل ۲۲). بررسی عددی این حالت نشان داد مقدار ظرفیت



شکل ۱۳. نمودار بار-جابجایی گروه اول: بررسی اثر فاصله دو ژئوسل نسبت به یکدیگر.

Fig. 13. Load-displacement diagram of the first group: Effect of the distance between two geocells relative to each other.



شکل ۱۴. نمونه کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه اول: الف) دو لایه ژئوسل با فاصله ۱۰ سانتی‌متر؛ ب) دو لایه ژئوسل با فاصله ۲۵ سانتی‌متر.

Fig. 14. Example of displacement distribution contours in the direction of load application (z) of the first group: a) Two layers of geocell with a distance of 10 cm; b) Two layers of geocell with a distance of 25 cm

جدول ۵. مشخصات مصالح ژئوگرید در راستای محور ضعیف.

Table 5. Geogrid material properties along the weak axis.

جهت	سایز چشمه (mm)	ابعاد نمونه (mm)		تعداد نوارها		مقاومت کششی نهایی (kN/m)	جرم واحد سطح (g/m ²)	سختی در کرنش ۲٪ (kN/m)
		طول	عرض	نوار طولی	نوار عرضی			
MD	۲۹	۱۴۹	۷۸	۳	۶	۱۲	۲۱۵	۲۰۴

جدول ۶. نتایج گروه دوم: بررسی اثر فاصله ژئوگرید جانمایی شده در بالا و پایین ژئوسل.

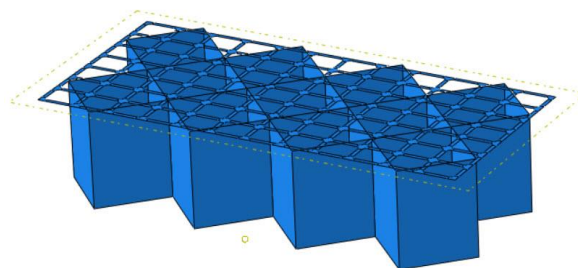
Table 6. Results of the second group: Effect of the distance of the geogrid placed above and below the geocell.

موقعیت ژئوگرید	ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای (نیوتن)	درصد افزایش نسبت به مدل پایه (%)
ژئوگرید چسبیده به پایین ژئوسل	۲۷۵۰	۱۹/۶
ژئوگرید در فاصله ۱۰ سانتی‌متری پایین ژئوسل	۲۸۰۰	۲۱/۷
ژئوگرید در فاصله ۲۰ سانتی‌متری پایین ژئوسل	۳۰۰۰	۳۰/۴
ژئوگرید در فاصله ۳۰ سانتی‌متری پایین ژئوسل	۳۱۰۰	۳۴/۸
ژئوگرید در فاصله ۴۰ سانتی‌متری پایین ژئوسل	۳۲۰۰	۳۹/۱
بدون ژئوگرید (مدل پایه)	۲۳۰۰	۰
ژئوگرید چسبیده به بالای ژئوسل	۲۶۰۰	۱۳/۰
ژئوگرید در فاصله ۵ سانتی‌متری بالای ژئوسل	۲۵۰۰	۸/۷
ژئوگرید در فاصله ۱۰ سانتی‌متری بالای ژئوسل	۲۴۵۰	۶/۵
ژئوگرید در فاصله ۱۵ سانتی‌متری بالای ژئوسل	۲۳۵۰	۲/۲

به‌طوری‌که ظرفیت باربری در خروج از مرکزیت ۲۵ سانتی‌متر، حدود ۳۰٪ نسبت به مدل پایه افزایش یافته است. نمایی از خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به مرکز توده خاک در شکل ۲۵ و نمودار بار-جابجایی خروج از مرکزیت ژئوسل برای فواصل مختلف نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش، در شکل ۲۶ و نمونه کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (Z) گروه پنجم در شکل ۲۷ ارائه شده است.

در شکل ۲۸، نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی برحسب نسبت بهبود ظرفیت باربری (نسبت ظرفیت باربری مدل مورد بررسی به ظرفیت باربری مدل پایه) صفحه بارگذاری در برابر پارامترهای نرمالیزه و بی‌بعد شده نسبت به عرض مهار در پژوهش کنونی ارائه شده و همان‌طور که نتیجه می‌شود، در بیشتر موارد پارامترهای مورد بررسی سبب افزایش ظرفیت باربری صفحه شده است.

در شکل ۲۸، S/B نسبت فاصله دو ژئوسل به عرض مهار، h/B نسبت ارتفاع پاکت به عرض مهار، e/B نسبت فاصله خروج از مرکزیت به عرض مهار، $z1/B$ نسبت فاصله عمودی موقعیت ژئوگرید در پایین ژئوسل به عرض مهار و $z2/B$ نسبت فاصله عمودی موقعیت ژئوگرید در بالای ژئوسل به عرض مهار است.

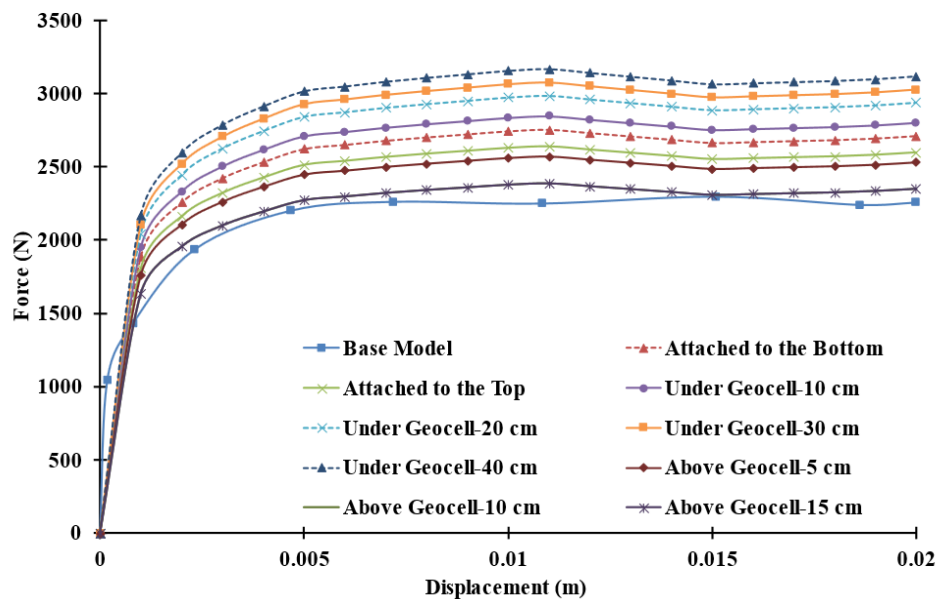


شکل ۱۵. نمایی از ژئوگرید قرارگرفته بر روی ژئوسل در مدل.

Fig. 15. A view of the geogrid placed on the geocell in the model

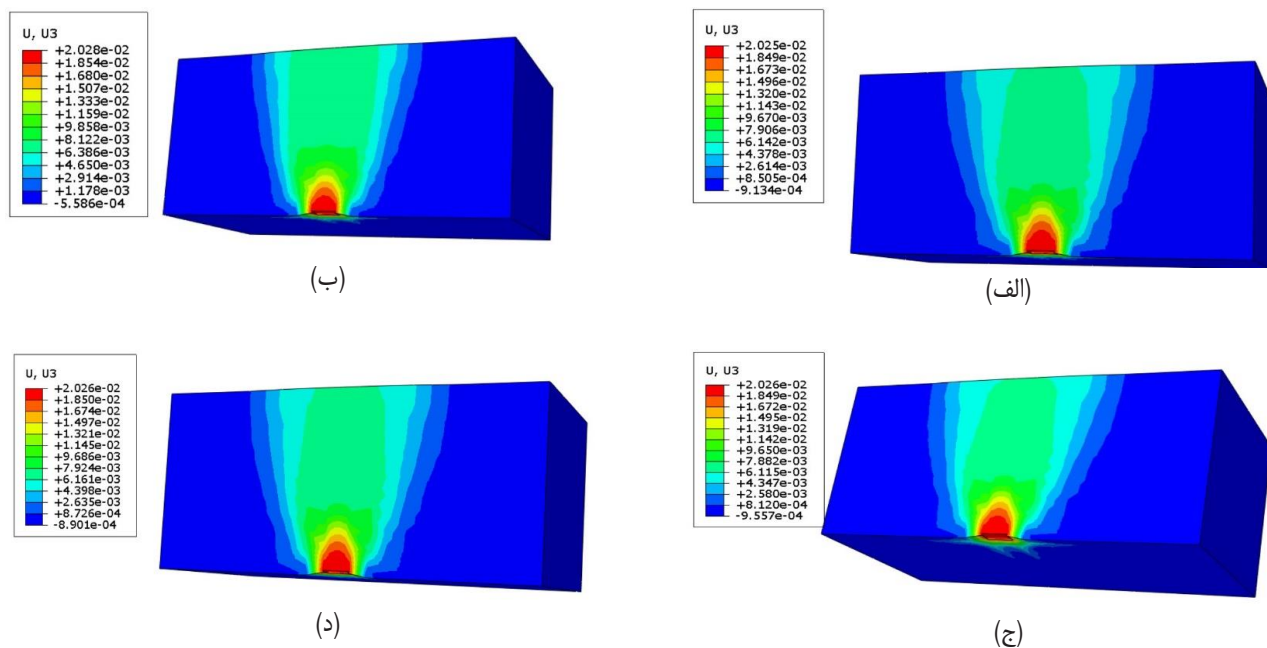
مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که نتایج در جدول ۸ ارائه شده است.

خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به محل بارگذاری، تأثیر مثبتی بر ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای دارد. هرچه خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به محل اعمال بار برکنش بیشتر می‌شود، کارایی نیز افزایش پیدا می‌کند؛



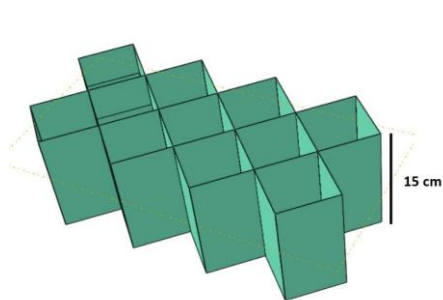
شکل ۱۶. نمودار بار-جابجایی گروه دوم: بررسی اثر فاصله ژئوگرید جانمایی شده در بالا و پایین ژئوسل.

Fig. 16. Load-displacement diagram of the second group: Effect of the distance of the geogrid placed above and below the geocell.



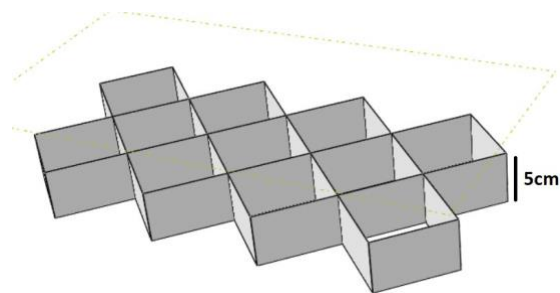
شکل ۱۷. نمونه کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه دوم: (الف) ژئوگرید پایین ژئوسل در فاصله ۱۰ سانتی‌متر؛ (ب) ژئوگرید پایین ژئوسل در فاصله ۴۰ سانتی‌متر؛ (ج) ژئوگرید چسبیده به بالای ژئوسل؛ (د) ژئوگرید بالای ژئوسل در فاصله ۱۵ سانتی‌متر.

Fig. 17. Sample displacement distribution contours in the direction of load application (z) of the second group: a) geogrid below the geocell at a distance of 10 cm; b) geogrid below the geocell at a distance of 40 cm; c) geogrid attached to the top of the geocell; d) geogrid above the geocell at a distance of 15 cm



شکل ۱۹. نمایی از ژئوسل با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر.

Fig. 19. View of a 15 cm-high geocell



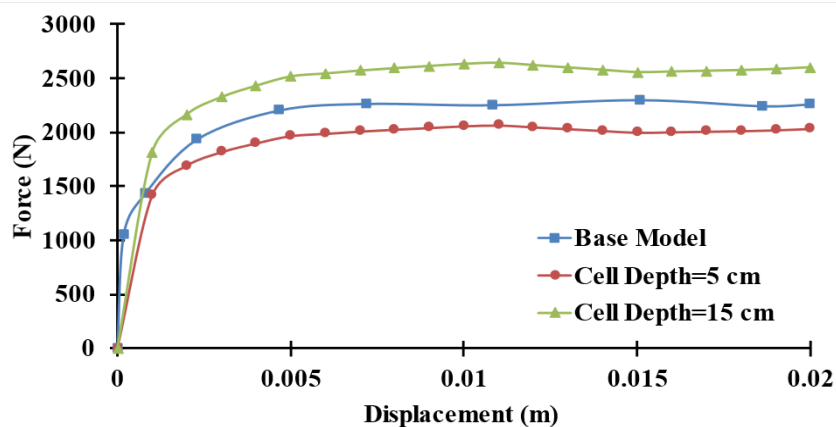
شکل ۱۸. نمایی از ژئوسل با ارتفاع ۵ سانتی‌متر.

Fig. 18. View of a 5 cm-high geocell.

جدول ۷. نتایج گروه سوم: بررسی اثر تغییر ارتفاع پاکت‌های ژئوسل.

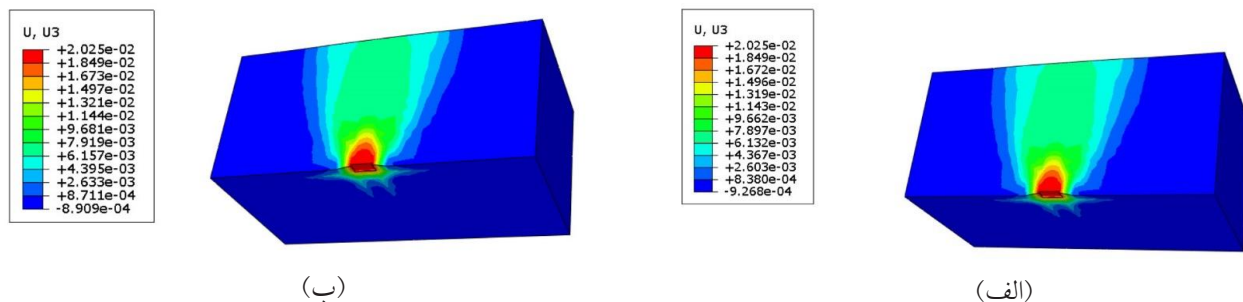
Table 7. Results of the third group: Effect of changing the height of geocell pockets.

ارتفاع پاکت ژئوسل (سانتی‌متر)	ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای (نیوتن)	درصد تغییر نسبت به مدل پایه (%)
۵	۲۰۰۰	-۱۳/۰
۱۰ (مدل پایه)	۲۳۰۰	۰
۱۵	۲۶۰۰	+۱۳/۰



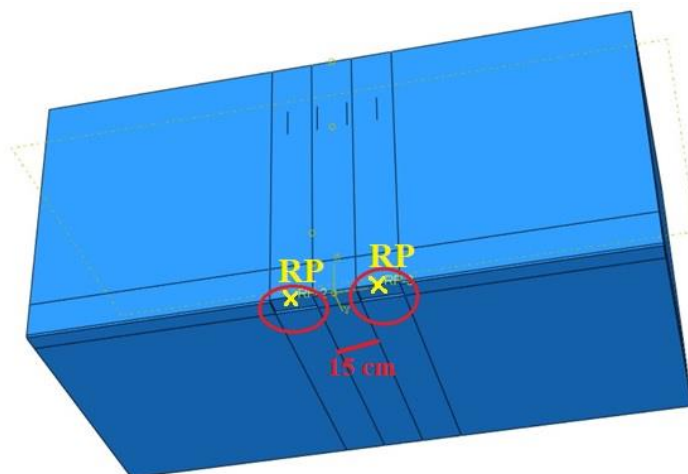
شکل ۲۰. نمودار بار-جابجایی گروه سوم: بررسی اثر تغییر ارتفاع پاکت‌های ژئوسل.

Fig. 20. Load-displacement diagram of the third group: Effect of changing the height of geocell pockets.



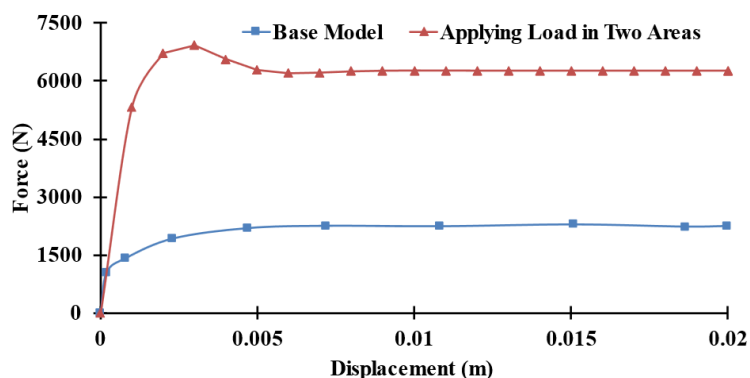
شکل ۲۱. کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه سوم: الف) ارتفاع پاکت ژئوسل ۵ سانتی‌متر؛ ب) ارتفاع پاکت ژئوسل ۱۵ سانتی‌متر.

Fig. 21. Displacement distribution contours in the direction of load application (z) of the third group: a) Geocell pocket height 5 cm; b) Geocell pocket height 15 cm.



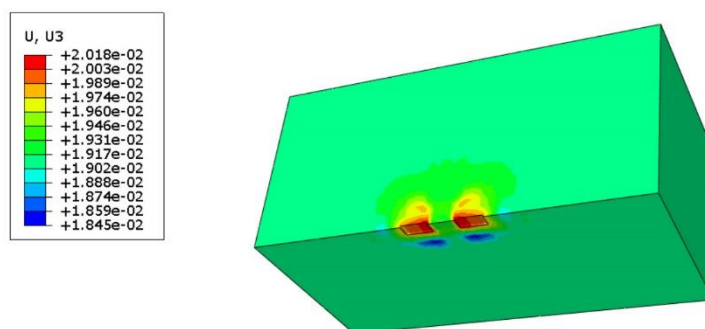
شکل ۲۲. نمایی از ژئوسل مدل با اعمال بار به دو مهار صفحه‌ای.

Fig. 22. View of the model geocell with load applied to two anchors.



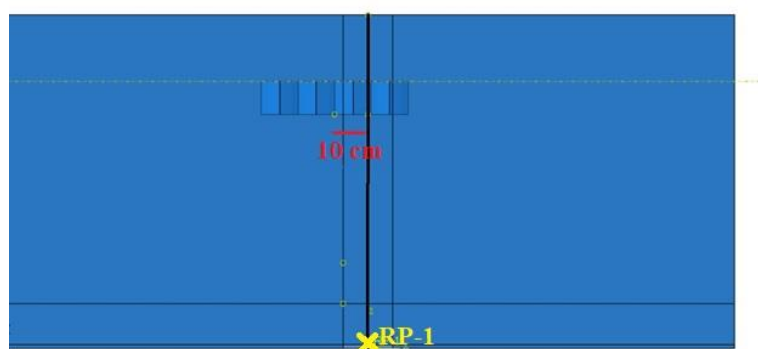
شکل ۲۳. نمودار بار-جابجایی گروه چهارم: بررسی اثر تغییر محل بارگذاری از یک ناحیه به دو ناحیه با فاصله ۱۵ سانتی‌متر.

Fig. 23. Load-displacement diagram of the fourth group: Effect of changing the loading location from one area to two areas with a distance of 15 cm



شکل ۲۴. کانتور توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه چهارم.

Fig. 24. Displacement distribution contour in the direction of load application (z) of the fourth group.



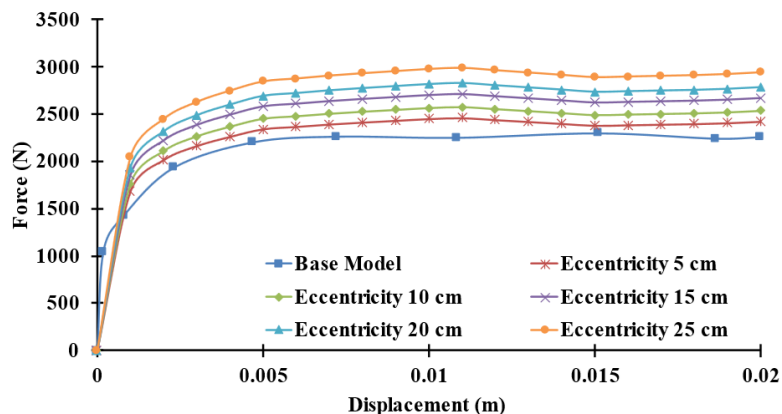
شکل ۲۵. نمایی از هندسه مدل با خروج ژئوسل از مرکز به فاصله ۱۰ سانتی‌متر.

Fig. 25. View of the model geometry with the geocell 10 cm eccentricity.

جدول ۸. نتایج گروه پنجم: بررسی اثر خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش.

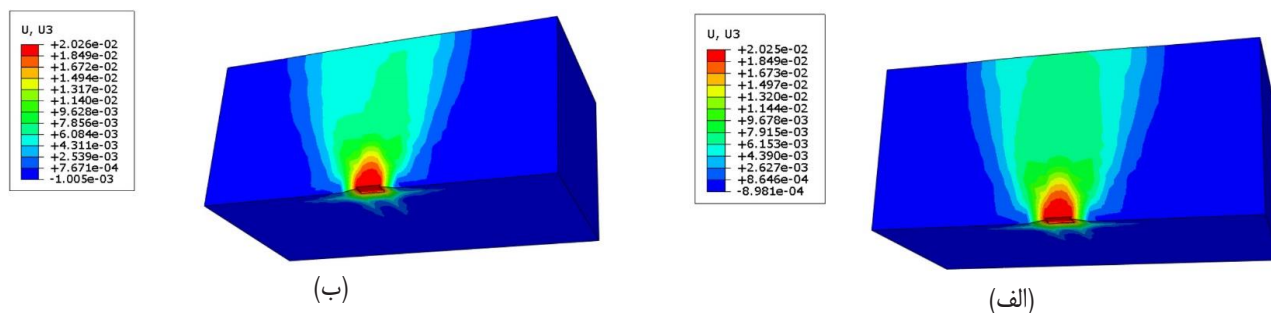
Table 8. Results of the fifth group: Effect of geocell eccentricity relative to the area of application of uplift load.

خروج از مرکزیت (سانتی‌متر)	ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای (نیوتن)	درصد تغییر نسبت به مدل پایه (%)
صفر (مدل پایه)	۲۳۰۰	۰
۵	۲۴۵۰	۶/۵
۱۰	۲۵۵۰	۱۰/۹
۱۵	۲۶۵۰	۱۵/۲
۲۰	۲۸۰۰	۲۱/۷
۲۵	۲۹۵۰	۲۸/۳



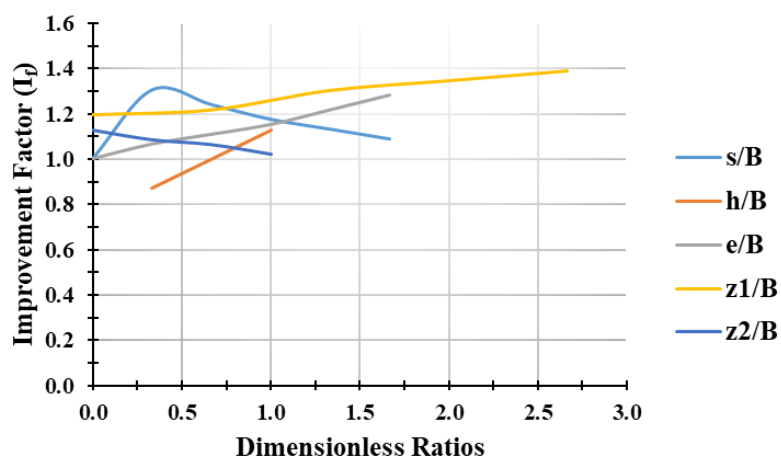
شکل ۲۶. نمودار بار-جابجایی گروه پنجم: بررسی اثر خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش.

Fig. 26. Load-displacement diagram of the fifth group: Effect of geocell eccentricity relative to the area of application of the uplift load.



شکل ۲۷. نمونه کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه پنجم: (الف) خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر؛ (ب) خروج از مرکزیت ۲۰ سانتی‌متر.

Fig. 27. Example of displacement distribution contours in the direction of load application (z) of the fifth group: a) 5 cm eccentricity; b) 20 cm eccentricity



شکل ۲۸. نمودار نسبت بهبود ظرفیت باربری در برابر پارامترهای نرمالیزه شده.

Fig. 28. Diagram of bearing capacity improvement ratio against normalized parameters

۴- بحث

نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی سه بعدی در نرم افزار ABAQUS نشان دهنده تأثیر قابل توجه ژئوسل و ژئوگرید بر بهبود ظرفیت باربری برکنشی مهارهای صفحه ای در خاک ماسه ای است.

در گروه اول، افزودن لایه دوم ژئوسل در فاصله نزدیک (۵ سانتی متر) منجر به افزایش $30/4\%$ ظرفیت باربری نسبت به مدل پایه شد که این بهبود با افزایش فاصله بین لایه ها به تدریج کاهش یافت و در فاصله ۲۵ سانتی متر، به تنها $8/7\%$ رسید. این روند معکوس را می توان به کاهش هم افزایی محصورشدگی سه بعدی خاک نسبت داد؛ جایی که توده خاک نزدیک تر به ژئوسل، با ایجاد یک سیستم یکپارچه تر، مقاومت برشی و اصطکاک دانه های خاک اطراف مهار را به طور مؤثرتری افزایش می دهند. در واقع با کاهش فاصله بین دو لایه ژئوسل، منطقه تداخل افزایش یافته و خاک میان دو لایه در یک ناحیه قفل شدگی سه بعدی قرار می گیرد. در این حالت، مسیر گسیختگی به صورت حبابی شکل توسعه یافته و نیروی برکنش به صورت گسترده تری در توده خاک توزیع شده که منجر به بهبود عملکرد صفحه مهار می شود؛ اما با افزایش فاصله لایه ها، نواحی مقاومتی کاملاً مستقل از هم رفتار نموده و مکانیزم یکپارچه محصورشدگی از بین می رود؛ در نتیجه ظرفیت به صورت غیرخطی کاهش می یابد. این یافته با نتایج مطالعات پیشین مانند پژوهش مرجع [۴] که گزارش نمودند ژئوسل تک لایه ای می تواند مقاومت برکنشی را افزایش دهد همخوانی دارد؛ اما افزودن لایه دوم در فواصل بهینه، می تواند بهره وری را دوچندان نماید. به علاوه، مقایسه با پژوهش دس و چوداری [۷] نشان می دهد که در مهارهای عمودی، ژئوسل چندلایه ای، جابجایی های بزرگ (تا ۷۰ درصد ارتفاع) را تحمل می کند که مکانیسم مشابهی در مدل افقی این پژوهش مشاهده و منجر به گسترش سطح گسیختگی و کاهش تغییرشکل های موضعی شد. این رفتار نشان می دهد که بهره گیری از دو لایه ژئوسل زمانی مؤثر است که فاصله قرارگیری آن ها کمتر از عمق مؤثر توزیع تنش باشد و یک کانال تنش پیوسته و مشترک بین دو لایه ایجاد شود. در واقع قرارگیری دو لایه ژئوسل در فاصله نزدیک، بیشترین کارایی را دارد و با افزایش فاصله، کارایی به طور یکنواخت کاهش پیدا می کند و هر چه فاصله بین لایه های ژئوسل بیشتر شود، مزیت حضور دو ژئوسل به حداقل می رسد.

در گروه دوم، ترکیب ژئوسل با ژئوگرید، به ویژه در موقعیت پایین ژئوسل (فاصله ۴۰ سانتی متر)، ظرفیت باربری را تا میزان $39/1\%$ افزایش داد؛ در حالی که قرارگیری ژئوگرید در بالای ژئوسل، بهبود کمتری (حداکثر تا 13%) به همراه داشت. این تفاوت را می توان به نقش ژئوگرید در تقویت

لایه های زیرین خاک نسبت داد؛ جایی که با افزایش عمق، فشارهای سربار بیشتر شده و ژئوگرید با توزیع تنش های کششی، اندرکنش خاک-مهار را بهبود می دهد. این نتیجه با یافته های کسکین [۱۵] که ژئوگرید چندلایه ای ظرفیت برکنشی را در ماسه تا حد قابل توجهی افزایش می دهد، مطابقت دارد. همچنین، با استفاده از تکنیک های PIV و OFDR نشان داده شده که موقعیت بهینه ژئوگرید (نزدیک مهار) شکل سطح گسیختگی را از عمودی به حبابی تغییر می دهد [۱۹]، که در پژوهش کنونی نیز کانتورهای جابجایی این تغییر را تأیید می نمایند. با این حال، کاهش کارایی ژئوگرید در موقعیت بالای ژئوسل ممکن است به دلیل تداخل کمتر با ناحیه تنش های برکنشی باشد، که پیشنهاد می شود در طراحی ها، اولویت به لایه های زیرین داده شود. در واقع، ژئوگرید زمانی بیشترین عملکرد را دارد که در ناحیه فعال تنش قرار گرفته و بتواند با ایجاد مکانیزم عملکرد غشائی، مانع گسترش جانبی خاک و توسعه گسیختگی شود؛ امری که در موقعیت بالای ژئوسل کمتر اتفاق می افتد.

گروه سوم نشان داد که تغییر ارتفاع پاکت ژئوسل به ۵ و ۱۵ سانتی متر، ظرفیت باربری را از کاهش ۱۳ درصدی به افزایش ۱۳ درصدی نسبت به مدل پایه با ارتفاع پاکت ۱۰ سانتی متر، تغییر می دهد. این بهبود مستقیماً به افزایش حجم محصورشدگی سه بعدی خاک نسبت داده می شود که مقاومت برشی را تقویت نموده و تغییرشکل ها را کاهش می دهد. این یافته با پژوهش مقدس تفرشی و همکاران [۱۰] هم راستا است که تحت بارگذاری سیکلی، ارتفاع بیشتر ژئوسل را عامل جلوگیری از گسیختگی پیش رونده معرفی نمودند. در مقایسه با یونکول و گوربوز [۱۱]، که نسبت ارتفاع ژئوسل به مهار را عامل کلیدی در افزایش ظرفیت برکنش دانستند، مدل پژوهش کنونی نیز نشان می دهد که افزایش ارتفاع پاکت ژئوسل منجر به افزایش ظرفیت برکنشی می شود که مهم ترین علت آن، اندرکنش بیشتر دانه های خاک با دیواره پاکت های ژئوسل است؛ اما ممکن است بهره وری اقتصادی را کاهش دهد؛ زیرا حجم ژئوسل مصرفی در پروژه، افزایش چشم گیری پیدا می کند. به علاوه، تحلیل کانتورهای تنش نشان داد که ژئوسل با ارتفاع بیشتر، مسیر گسیختگی را به سمت عمق هدایت نموده و مقاومت مؤثر خاک را از حالت سطحی به حالت حجمی تبدیل می کند که این موضوع، مکانیسم تقویت عملکرد را به خوبی توجیه می نماید.

در گروه چهارم، تغییر از یک ناحیه بارگذاری به دو ناحیه با فاصله ۱۵ سانتی متر، ظرفیت را بیش از $20/4\%$ افزایش داد که این بهبود قابل توجه را می توان به توزیع گسترده تر تنش ها و درگیر شدن حجم بیشتری از توده خاک مسلح نسبت داد. این نتیجه با پژوهش بوهومیک و همکاران [۱۷] همخوانی

دارد، که مهارهای I-شکل و L-شکل با توزیع بار چندنقطه‌ای، مقاومت کششی را تا ۹۰ درصد افزایش دادند. بارگذاری دوگانه سبب همپوشانی دو ناحیه مقاومتی شده و منطقه تأثیر بزرگ‌تری ایجاد می‌کند که موجب توسعه یک حباب گسیختگی مشترک و افزایش محسوس ظرفیت مهار می‌شود؛ رفتاری که در حالت تک‌بارگذاری مشاهده نمی‌شود.

سرانجام، گروه پنجم نشان داد که خروج از مرکزیت ژئوسل تا ۲۵ سانتی‌متر، ظرفیت را تا ۲/۲۸ درصد افزایش داد، که این امر به جبران عدم تقارن تنش‌ها و گسترش ناحیه مقاومتی نسبت داده می‌شود. این نتیجه با یافته‌های موکورجی و همکاران [۱۶] که زوایای مختلف بارگذاری را عامل بهبود ظرفیت دانستند، انطباق دارد. تحلیل‌ها نشان داد که در خروج از مرکز کنترل‌شده، ناحیه فعال مقاومتی گسترده‌تر شده و موجب انتقال تنش به بخش‌های مقاوم‌تر توده خاک می‌شود؛ ولی در خروج از مرکز بیش از حد، تعادل تنش‌ها برهم خورده و کارایی کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

یافته‌های اصلی نشان‌دهنده افزایش ظرفیت تا ۳۰٪ با دو لایه ژئوسل نزدیک به یکدیگر، تا ۳۹٪ با ترکیب ژئوگرید در موقعیت قرارگیری پایین ژئوسل، ۱۳٪ با افزایش ارتفاع پاکت، ۲۰۴٪ با بارگذاری دو ناحیه‌ای و تا ۲۸٪ با خروج از مرکزیت ژئوسل است. این بهبودها عمدتاً ناشی از محصورشدگی سه‌بعدی، توزیع تنش و گسترش سطح گسیختگی است که کارایی ژئوسنتتیک‌ها را به‌عنوان راهکاری اقتصادی در پروژه‌های ژئوتکنیکی تأیید می‌نماید.

۱- نقش ژئوسنتتیک‌های متنوع: نه تنها تسلیح خاک با لایه ژئوسل به‌طور معنی‌دار ظرفیت کششی مهار صفحه‌ای را افزایش می‌دهد؛ بلکه افزودن یک لایه ژئوسل اضافی نیز سبب افزایش بسیار قابل‌توجه در ظرفیت باربری مهار می‌شود. استفاده توأم از ژئوسل و ژئوگرید نیز بهتر از به‌کارگیری هر یک از این نوع ژئوسنتتیک‌ها به‌تنهایی است؛ به‌طوری‌که چنانچه ژئوگرید زیر ژئوسل قرار گیرد، بیشترین تأثیر را در محدودسازی تغییرشکل‌های جانبی و افزایش ظرفیت باربری خواهد داشت؛

۲- اثر نحوه جانمایی لایه مسلح‌کننده: موقعیت قرارگیری ژئوگرید در سیستم خاک-مهار-ژئوسنتتیک اهمیت دارد. نتایج نشان دادند که ژئوگرید تماس‌دار با لایه ژئوسل و یا نزدیک‌تر به آن چنانچه در پایین لایه ژئوسل قرار گیرند، کارایی به‌مراتب بیشتری نسبت به زمانی که در بالای لایه ژئوسل جانمایی می‌شوند، دارد؛

۳- ابعاد و خروج از مرکزیت: ژئوسل‌هایی با ارتفاع پاکت‌های بلندتر، به‌دلیل افزایش حجم توده خاک درگیر تسلیم و اندرکنش بیشتر بین خاک و ژئوسل، ظرفیت باربری را افزایش می‌دهند. همچنین، خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش و استفاده از دو ناحیه اعمال بار، سبب افزایش ظرفیت باربری می‌شود.

در نهایت، نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب بهینه آرایش، ابعاد و موقعیت ژئوسنتتیک‌ها می‌تواند عملکرد مهارهای صفحه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا دهد و پیشنهاد می‌شود در طراحی، اولویت به ترکیب ژئوسل-ژئوگرید در لایه‌های زیرین و با خروج از مرکزیت مناسب داده شود.

۶- محدودیت‌ها و پیشنهادها

با وجود این یافته‌ها، پژوهش کنونی محدودیت‌هایی دارد:

۱- مدل عددی بر پایه فرضیات الاستوپلاستیک موهر-کولمب استوار است که ممکن است رفتار واقعی خاک‌های ناهمگن یا تحت بارگذاری دینامیکی را به‌طور کامل بازتاب ندهد؛

۲- مقیاس مدل نسبت به مقیاس پروژه‌های واقعی و اجرایی کوچک است که می‌تواند منجر به بیش‌برآورد ظرفیت شود؛

۳- عدم در نظر گرفتن عوامل محیطی مانند رطوبت یا فرسایش ژئوسنتتیک‌ها، کاربرد نتایج را محدود می‌کند. به‌علاوه، تمرکز بر خاک ماسه‌ای با دانسیته متوسط، تعمیم‌پذیری به خاک‌های چسبنده یا ریزدانه را کاهش می‌دهد؛

۴- نتایج این پژوهش جایگزین تحلیل و طراحی برای سیستم‌های دیگر پی نیست، بلکه رویکردی برای بهبود عملکرد مهارهای صفحه‌ای در خاک ماسه‌ای ارائه می‌کند. به‌کارگیری این نتایج در پروژه‌های واقعی مستلزم در نظر گرفتن شرایط ژئوتکنیکی محل، نوع بارگذاری، محدودیت‌های اجرایی و ملاحظات اقتصادی است. بنابراین می‌توان از یافته‌های این پژوهش به‌عنوان ابزاری کمکی جهت بهینه‌سازی آرایش و ابعاد سیستم‌های مهار خاک استفاده نمود.

پژوهش‌های آتی می‌تواند بر بارگذاری‌های سیکلی، خاک‌های متنوع و مدل‌های هیبریدی متمرکز شوند تا کاربردهای گسترده‌تری در مهندسی ژئوتکنیک فراهم آید. به‌همین منظور جهت انجام پژوهش‌های آتی، پیشنهادها زیر ارائه می‌شوند:

۱- گسترش پارامترها: بررسی اثر انواع متفاوت ژئوگرید (مانند همسان و ناهمسان) و تنوع در ویژگی‌های مکانیکی خاک (بررسی انواع خاک)

- [7] S.K. Dash, A.K. Choudhary, Geocell reinforcement for performance improvement of vertical plate anchors in sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 46(2) (2018) 214–225.
- [8] K. Yünkül, Ö.F. Usluoğulları, A. Gürbüz, Numerical Analysis of Geocell Reinforced Square Shallow Horizontal Plate Anchor, *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(4) (2021) 3081–3099.
- [9] Y. Zhao, Z. Lu, H. Venkateswarlu, A. Tabaroei, B. Ateş, C. Tang, Y. Feng, H. Yao, Three-dimensional numerical analysis of uplift capacity for horizontal plate anchors in geocell-reinforced sandy soil, *Computers and Geotechnics*, 191 (2026).
- [10] S.N. Moghaddas Tafreshi, M. Rahimi, A.R. Dawson, B. Leshchinsky, Cyclic and post-cycling anchor response in geocell-reinforced sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 56(11) (2019) 1700–1718.
- [11] K. Yünkül, A. Gürbüz, Uplift behavior of shallow horizontal plate anchors reinforced with geocells in cohesionless soil, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(4) (2022) 1243–1266.
- [12] A.K. Choudhary, S.K. Dash, Failure mechanism of geocell-reinforced vertical plate anchors subjected to lateral loading, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 23(2) (2023) 58–76.
- [13] M. Aliasgharzadeh, M. Yosefzadeh, M. Atrchian, M. Bayat, Laboratory Investigation of the Pull-out Capacity of Circular Plate Anchor Buried at a Shallow Depth in Granular Soils Improved with Geocell and Geotextile, *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 15(3) (2024) 3785–3798. (In Persian)
- [14] T. Nagatani, Y. Sawada, Y. Inoue, S. Ito, H.I. Ling, T. Kawabata, New geocell utilisation as a pipe uplifting countermeasure and its validation using model experiments, *Geotextiles and Geomembranes*, 52(3) (2024) 319–331.
- [15] M.S. Keskin, Model studies of uplift capacity behavior of square plate anchors in geogrid-reinforced sand, *Geomechanics and Engineering*, 8(4) (2015) 595–613.
- [16] S. Mukherjee, L. Kumar, A.K. Choudhary, G.L.S. در تحلیل‌های عددی، بارگذاری‌های سیکلی یا دینامیکی و شرایط مرزی متفاوت؛
- ۲- تحلیل‌های پیچیده‌تر: توسعه مدل‌های عددی سه‌بعدی با مصالح غیرخطی‌تر (مدل‌های کشسان-خمیری) و در نظر گرفتن اثر هم‌زمان تغییر شکل‌های بزرگ و بررسی حساسیت نتایج نسبت به پارامترهای مختلف؛
- ۳- ترکیب رویکردها: مطالعه تجربی-عددی مشترک، مانند بهره‌گیری از سنسورهای ثبت کرنش یا تصویرنگاری جهت ردیابی فرآیند شکست که می‌تواند موجب بهینه‌سازی طرح تسلیح (انتخاب دقیق‌تر نوع، ابعاد و نحوه قرارگیری لایه ژئوستتیک) شود؛
- ۴- شبیه‌سازی شرایط نزدیک به واقعیت: مدل‌سازی کامل پی و در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در شرایط واقعی.

منابع

- [1] M.E. Mahmudi Mehrizi, Y. Daghigh, J. Nazari Afshar, A review of types of anchors and their roles in geotechnical engineering, in: *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Infrastructure*, Tabriz, Iran, 2015. (In Persian)
- [2] A.K. Choudhary, S.K. Dash, Uplift behaviour of horizontal plate anchors embedded in geocell-reinforced sand, in: *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Roorke, India, 2013.
- [3] S.S. Shariati, Numerical study of the uplift behaviour of plate anchor in reinforced soil, Master of science thesis, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, 2022. (In Persian)
- [4] M. Rahimi, S.N. Moghaddas Tafreshi, B. Leshchinsky, A.R. Dawson, Experimental and numerical investigation of the uplift capacity of plate anchors in geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6) (2018) 801–816.
- [5] S.N. Moghaddas Tafreshi, S. Javadi, A.R. Dawson, Influence of geocell reinforcement on uplift response of belled piles, *Acta Geotechnica*, 9(3) (2014) 513–528.
- [6] V. Kishor Kumar, K. Ilamparuthi, Performance of anchor in sand with different forms of geosynthetic reinforcement, *Geosynthetics International*, 27(5) (2020) 503–522.

- Geomembranes, 50(5) (2022) 994–1003.
- [20] S. Mukherjee, G.L.S. Babu, Three-dimensional numerical analysis of large-scale horizontal square anchors in geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 52(4) (2024) 790–799.
- [21] S.N. Moghaddas Tafreshi, A.R. Dawson, A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 32 (2012) 55–68.
- [22] C. Yoo, S. Kim, Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: Full-scale load test and 3D finite element analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(6) (2008) 460–472.
- Babu, Pullout resistance of inclined anchors embedded in geogrid reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5) (2021) 1368–1379.
- [17] R. Bhowmik, J.T. Shahu, M. Datta, Experimental studies on inclined pullout behaviour of geosynthetic sheet Vis-À-Vis geogrid - Effect of type of anchor and sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 47(6) (2019) 767–779.
- [18] S. Bildik, E.A. Dickin, M.S. Keskin, K. Ilamparuthi, M. Laman, Centrifuge Model Tests and Numerical Analysis of Uplift Capacity of Strip Anchors in Geogrid-Reinforced Sand, *Applied Sciences*, 13(7) (2023).
- [19] Y.-X. Gao, H.-H. Zhu, Y.-F. Ni, C. Wei, B. Shi, Experimental study on uplift behavior of shallow anchor plates in geogrid-reinforced soil, *Geotextiles and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Sh. Shariati, D. Moazzami, A. Tabaroei, A. Mahmoudi, *Numerical and Practical Analysis of the Uplift Behavior of Plate Anchors in Reinforced Soils: Optimization of Bearing Capacity*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(9) (2025) 1697-1722.

DOI: [10.22060/ceej.2026.24800.8350](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.24800.8350)

