



Numerical study of spudcan penetration on two-layered soil with Lagrangian-Eulerian couple

Kamal Alikhani¹ , Morteza Bakhtiari² , Etemadaldin Rabie Gholami³ 

¹ MS.c graduated of Coastal ports and marine structures engineering, Department of Marine Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Sciences and Techniques, Khorramshahr, Iran. E-mail: kamal.alikhani2014@gmail.com

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Marine Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technologies, Khorramshahr, Iran. E-mail: bakhtiari@kmsu.ac.ir

³ MS.c graduated of Science of Naval Architectures, Department of Naval Architectures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technologies, Khorramshahr, Iran. E-mail: rabei.emad@yahoo.com

ABSTRACT

Knowing about the soil flow mechanisms around the foundation of the spudcan that are subjected to continuous large penetration and also estimating the probability and severity of a sudden spudcan penetration are very important issues. In the present research, a numerical study was carried out to investigate the bearing capacity of the spudcan foundation of the offshore jackup structure in soil, with a two-layer system of sand on clay, using the Lagrangian-Eulerian couple method (CEL). In this research, the effect of characteristics of sand and clay layers, including relative density (ID) and thickness of sand layer, shear strength at the boundary of two layers (s_u), gradient of shear strength of clay layer on bearing capacity and punch rupture phenomenon are studied. In this research, the Mohr-Coulomb model was used to model the behavior of sandy and clay soils. The results of the research show that the parameters related to geotechnical characteristics, including the shear strength of the clay layer, the shear resistance gradient, the relative density of the sand layer, and the thickness of the sand layer have a direct relationship with the bearing strength of the spudcan foundation. So that with the increase of each of these characteristics, the bearing resistance also increases. The results obtained for changing the thickness of the sand layer (6, 7 and 8 meters) show the values of 263, 307 and 346 kPa for peak of bearing capacity. Also for the shear resistance at the border of two layers 11, 15, 20 kPa values of 307, 347 and 390 kPa have been obtained. For the values of relative density of sandy soil from 20 to 60%, the peak bearing capacity is calculated as 328, 343 and 367 kilopascals

Keywords: spud can, Lagrangian-Eulerian couple, Abaqus soft ware, punch, relative density

Article Type: Research Article

Article history: Received: 25 September 2023 Revised: 01 December 2023 Accepted: 22 December 2023 ePublished: 22 December 2023

1. Introduction

Self-elevating offshore platforms or jack-ups are one of the most common types of offshore platforms that are built for oil and gas extraction. According to the investigations, one third of the accidents that happened to jackups are related to their foundation, and more than 53% of the accidents related to the jackup foundation are related to punch penetration type, which sometimes leads to the buckling of the foundations. Nowadays, it is customary to use spudcan as the foundation of the jackup drilling platform. A rapid penetration (punch penetration rupture) during operation, in special geotechnical conditions where a strong soil layer is placed on a weak layer, so that the spudcan foot punches a mass of soil from the strong layer into the weak layer. It happens Hence, when a spudcan is penetrating a layered soil of sand over clay. It is necessary to have sufficient information about the soil rupture mechanisms under the spudcan in order to predict the performance of the spudcan. Therefore, simplified conceptual models such as the projected area method, the punch cut method, Teh model 2007, Lee model 2013, and Hu model 2014, in order to estimate the bearing capacity of a spudcan infiltrating sand layered soil on clay, have been developed (Dier et al. 2004, Drescher et al. 1993, Gao et al. 2012, Gerwick 1970, Hansen et al. 1970).

2. Methodology

Nowadays, numerical methods can be a good tool to estimate the bearing capacity of Spadcan foundation. However, the simulation of the deep penetration process of a Spadcan foundation in the seabed is difficult due to the numerical convergence problem caused by 1) distortion of meshes due to severe deformation, 2) nonlinear materials due to complex soil behavior, 3) nonlinear boundary conditions including contact Friction requires the use of techniques that can overcome these problems. For this purpose, in this research, numerical simulation has been performed using the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method. Soil is considered as the Eulerian part and Spudken is considered as the Lagrangian part of the CEL technique. It should be noted that several problems were analyzed by Gio et al. 2011 .in order to measure the accuracy of the CEL method, and the results show the ability of this method to solve numerical problems involving large deformations that can be achieved using classical finite element methods. It did not give them acceptance (Hu et al. 2014). Abaqus software was used in order to

carry out this research. This software is a set of very capable modeling programs, based on the finite element method, capable of solving problems from a simple linear analysis to the most complex nonlinear modeling. This software has a very wide set of elements that any type of geometry can be modeled virtually by these elements. It also has a lot of engineering material models that can be used to model all kinds of materials with different properties and behaviors such as metals, rubbers, polymers, composites, reinforced concrete, spring foams and also breakable materials as well as materials in the ground such as soil and stone. Considering that Abaqus is a general and extensive modeling tool, its use is not limited to the mechanical analysis of solids and structures (stress-displacement). By using this software, various issues such as heat transfer, mass penetration, thermal analysis of electrical components, acoustics, soil mechanics and piezoelectricity can be studied. The soil geometry was modeled in a three-dimensional Eulerian domain by means of linear hexahedral elements of the EC3D8R type. Each Eulerian element has 8 nodes and it allows to have several Eulerian elements at the same time. It should be noted that until now there is no two-dimensional element in Abaqus for the Eulerian method. Due to the geometric symmetry of the model and to reduce the calculation time, only a quarter of the entire model was modeled in the 3D analysis. Also, a layer with a low height and empty of material is taken on top of the sand layer so that a volume of soil around the spudcan, which flows upwards during infiltration, enters into the empty layer.

3. Results and discussion

The results of the research show that the parameters related to geotechnical characteristics, including the shear strength of the clay layer, the shear resistance gradient, the relative density of the sand layer, and the thickness of the sand layer have a direct relationship with the bearing strength of the Spadcan foundation. So that with the increase of each of these characteristics, the bearing resistance also increases. The obtained results showed that by increasing the thickness (H_s) and relative density (ID) of the sand layer, the load bearing capacity of the spudcan (q) and the volume of the transferred sandy soil mass (the height of the soil mass (h_{plug}) and the width of the soil mass) (b_{plug}) increases, so that with the increase of H_s from 6 m to 8 m, the value of q_{peak} increases from 263 kPa to 346 kPa, the value of h_{plug} from 6.52 m to 8.26 m and the value of b_{plug} from 6.6 m to 6.9 m and with the increase of ID from 20% to 60% increases the q_{peak} value from 328 kPa to 367 kPa, the h_{plug} value from 6.85 m to 7.14 m, and the b_{plug} value from 5.7 m to 6 m. Also, the investigation of the effects of shear resistance (su_0) and shear resistance gradient (ρ) of the clay layer shows their direct relationship with the bearing capacity and the reverse relationship with the volume of the transferred soil mass, so that with the increase of su_0 from 11 kPa to 20 kPa, the value of q_{peak} from 307 kPa to 390 kPa, the value of h_{plug} from 7.41 m to 7.14 m and the value of b_{plug} from 6.9 m to 6.6 m, and with the increase of ρ from 1 kPa/m to 2 kPa/m, the value of q_{peak} from 314 kPa to 352 kPa, the value of h_{plug} goes from 7.14 m to 6.9 m and the value of b_{plug} goes from 6 m to 5.7 m.

4. Conclusions

The results of this research can be summarized as follows:

Parameters related to geotechnical characteristics, including shear resistance of clay layer, gradient of shear resistance, relative density of sand layer, thickness of sand layer have a direct relationship with the load bearing strength of the foundation. So that with the increase of each of these characteristics, the bearing resistance also increases. The severity and risk of punch breakage increases with the increase in the thickness of the sand layer and the decrease in the shear strength of the clay layer. The soil rupture pattern under the infiltrating spudcan foundation changes with respect to the depth, such that at surface depths, the rupture has two components, shear along the almost vertical shear plane in the sand layer and local shear rupture in the clay layer.

5. References

- Teh, K. L. (2007). Punch-through of spudcan foundation on sand overlying clay. PhD thesis, National University of Singapore. <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/28149>
- Lee, K. K., Randolph, M. F., & Cassidy, M. J. (2013). Bearing capacity on sand overlying clay soils: A simplified conceptual model. *Geotechnique*, 63(15), 1285-1297. <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.176>
- Dier, A., Carrol, B., & Abolfathi, S. (2004). Guidelines For Jack Up Rigs with Particular Reference to Foundation Integrity, Health and Safety Executive (HSE), Research Report, 1-91. <https://www.hse.gov.uk/Research/rhrtm/tr289.htm>
- Drescher, A., & Detournay, E. (1993). Limit load in translational failure mechanisms for associative and non-associative materials. *Geotechnique*, 43(3), 443-456. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.443>
- Gao, W., Yu, L., & Hu, Y. (2012). Large deformation FE analysis of large diameter spudcan penetration into two-layer of uniform clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6(2), 171-177. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2012.06.02.171-177>
- Gerwick, B. C. (1986). Construction of offshore structures. John Wiley, New York. <https://doi.org/10.1201/9780849330520>
- Hansen, J. B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. *Bulletin of the Danish geotechnical institute*, 28, 5-11. <https://www.semanticscholar.org>
- Hu, P., Stanier, S. A., Cassidy, M. J., & Wang, D. (2014). Predicting peak resistance of spudcan penetrating sand overlying clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001016)

6. Declaration of interest

The authors report no declarations of interest.

7. Acknowledgment

This work was supported by the Khorramshahr University of Marine Science and Technology.

Cite this article: Alikhani, K., Bakhtiari, M., & Rabie Gholami, E. (2023). Numerical study of spudcan penetration on two-layered soil with Lagrangian-Eulerian couple, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 18-40. DOI: 10.22126/ATWE.2024.9898.1067





مطالعه عددی نفوذ اسپادکن بر روی خاک دولایه ای با روش کوپل لاگرانژی - اوپلری

کمال علیخانی^۱، مرتضی بختیاری^۲، اعتمادالدین رباعی غلامی^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، گروه مهندسی سازه های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: kamal.alikhani2014@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی سازه های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: bakhtiari@kmsu.ac.ir

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی کشتی سازی، گروه مهندسی کشتی سازی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: rabei.emad@yahoo.com

چکیده

آگاهی در مورد مکانیسم های جریان خاک پیرامون پی اسپادکن که متحمل نفوذ بزرگ مداوم می شوند و نیز برآورد کردن احتمال و درجه شدت یک نفوذ ناگهانی اسپادکن از موضوعات بسیار حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر، اقدام به مطالعه عددی بررسی ظرفیت باربری پی اسپادکن سازه جکاپ فراساحلی در خاک، با سیستم دو لایه ای ماسه بر روی رس، با روش کوپل لاگرانژی - اوپلری (CEL) گردید. در این پژوهش تأثیر خصوصیات لایه های ماسه ای و رسی از جمله تراکم نسبی (ID) و ضخامت لایه ماسه ای، مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (SU₀)، گرادیان مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری و پدیده گسیختگی پنج مورد مطالعه قرار گرفت در تحقیق حاضر برای مدل سازی رفتار خاک های ماسه ای و رسی از مدل موهر-کلمب استفاده گردید. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد، پارامترهای مرتبط با خصوصیات ژئوتکنیکی شامل مقاومت برشی لایه رسی، گرادیان مقاومت برشی، تراکم نسبی لایه ماسه ای، ضخامت لایه ماسه ای نسبت مستقیم با مقاومت باربری پی اسپادکن دارند به طوری که با افزایش هر کدام از این خصوصیات، مقاومت باربری نیز افزایش می یابد. نتایج به دست آمده برای تغییر ضخامت لایه ماسه ای (۶، ۷ و ۸ متر) مقادیر ۲۶۳، ۳۰۷ و ۳۴۶ کیلو پاسکال را برای ظرفیت باربری اوج نشان می دهد. همچنین برای مقاومت برشی موجود در مرز دولایه ۱۱، ۱۵ و ۲۰ کیلو پاسکال مقادیر ۳۰۷، ۳۴۷ و ۳۹۰ کیلو پاسکال به دست آمده است. برای مقادیر تراکم نسبی خاک ماسه ای از ۲۰ تا ۶۰ درصد، میزان ظرفیت باربری اوج ۳۲۸، ۳۴۳ و ۳۶۷ کیلو پاسکال محاسبه شده است.

واژه های کلیدی: اسپادکن، کوپل لاگرانژی - اولر، نرم افزار آباکوس، گسیختگی، تراکم نسبی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

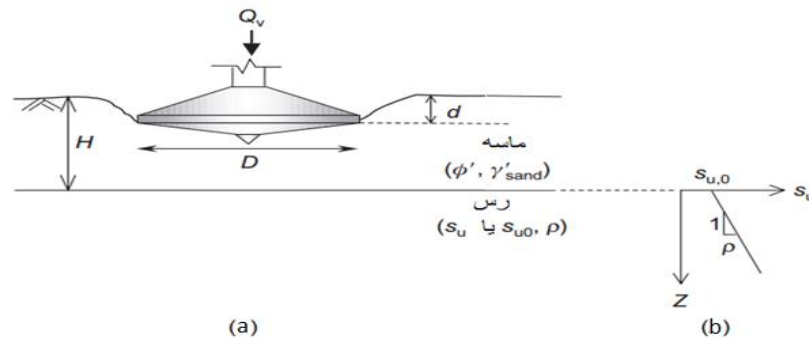
سابقه مقاله: دریافت: ۰۲ مهر ۱۴۰۲ اصلاح: ۱۰ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۱ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۱ دی ۱۴۰۲

استناد: علیخانی، ک، بختیاری، م، و رباعی غلامی، ا. (۱۴۰۲). مطالعه عددی نفوذ اسپادکن بر روی خاک دولایه ای با روش کوپل لاگرانژی - اوپلری، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۴)، ۱۸-۴۰. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.9898.1067



مقدمه

سکوه‌های دریایی خود بالابر یا جک‌آپ‌ها یکی از متداول‌ترین نوع سکوه‌های دریایی می‌باشند که برای استحصال نفت و گاز ساخته می‌شوند. بر طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده، یک‌سوم حوادثی که برای جک‌آپ‌ها رخ داده در ارتباط با شالوده آن‌ها بوده و بیش از ۵۳ درصد از حوادث مربوط به شالوده جک‌آپ از نوع نفوذ پانچ است که در بعضی مواقع منجر به کمانش پایه‌ها، انهدام سکو و یا واژگون شدن آن می‌گردد. امروزه از استفاده از اسپادکن به‌عنوان پی سکوی حفاری جک‌آپ مرسوم است. یک نفوذ سریع (گسیختگی نفوذ پانچ) در حین عملیات، در شرایط خاص ژئوتکنیکی که در آن لایه خاک قوی بر روی لایه‌ای ضعیف قرار گرفته، به‌طوری‌که پی اسپادکن توده‌ای از خاک لایه قوی را به داخل لایه ضعیف پانچ می‌کند، اتفاق می‌افتد. از این‌رو زمانی که یک اسپادکن در حال نفوذ در یک خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس است که در شکل (۱) نشان داده شده است. داشتن اطلاعات کافی در مورد مکانیسم‌های گسیختگی خاک زیر اسپادکن، به‌منظور پیش‌بینی عملکرد اسپادکن لازم است. از این‌رو مدل‌های مفهومی ساده‌شده‌ای همچون روش منطقه پیش‌بینی‌شده^۱، روش برش پانچ^۲ مدل ته^۳ (۲۰۰۷)، مدل لی^۴ (۲۰۱۳) و مدل هوو^۵ (۲۰۱۴)، به‌منظور تخمین ظرفیت باربری یک اسپادکن در حال نفوذ در خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، توسعه داده‌شده‌اند (دیر و همکاران^۶، ۲۰۰۴؛ درسچر و همکاران^۷، ۱۹۹۳؛ گائو و همکاران^۸، ۲۰۱۲؛ گرویک^۹، ۱۹۷۰؛ و هانسن و همکاران^{۱۰}، ۱۹۷۰).

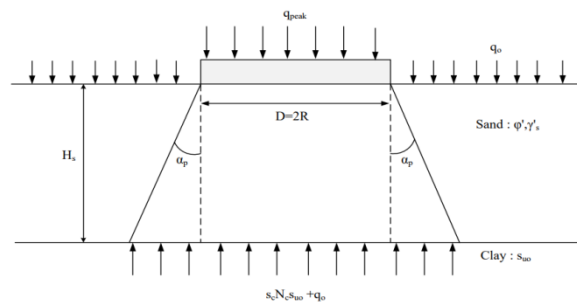


شکل ۱. (a) نفوذ پی اسپادکن در خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، (b) دیاگرام مقاومت برشی لایه رسی

¹ projected area
² punching shear
³ The et al
⁴ Lee
⁵ Hu
⁶ Dier et al
⁷ Drescher et al
⁸ Gao et al
⁹ Gerwick
¹⁰ Hansen et al

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

استخراج نفت و گاز در نواحی فراساحل با استفاده از انواع مختلف سازه دکل (متحرک و ثابت) که دربردارنده کل تجهیزات حفاری و محل اسکان خدمه هستند، انجام می‌شود. چندین نوع سازه دکل امروز در فراساحل مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب نوع خاصی از این دکل‌ها به هزینه استقرار، عمق مؤثر و عملیاتی آب و شرایط محیطی قابل انتظار بستگی دارد. یک سکو امکان انجام فعالیت در اعماق سطحی آب، بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر را دارا است. دکل‌های جکاپ مدرن می‌توانند تا عمق آب حدود ۱۵۰ متر فعالیت کنند. در اعماق متوسط تا خیلی عمیق، سکوه‌های نیمه مستغرق و کشتی‌های حفاری‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که از نوع شناور بوده و برای حفظ پایداری‌شان احتیاج به لنگر است. امروزه سکوه‌های جکاپ در همه‌ی حوضه‌های استخراج فراساحلی در حال فعالیت است. آن‌ها بیشتر در خاورمیانه، جنوب شرق آسیا، خلیج مکزیک و دریای شمال متمرکز شده‌اند. استفاده از اسپادکن به‌عنوان پی سکوی حفاری جکاپ بسیار متداول است. در شرایط قرارگیری اسپادکن بر روی خاک با سیستم دولایه‌ای ماسه بر روی رس، پاسخ ظرفیت باربری در شکل (۲) نشان داده شده است. به‌منظور ارزیابی خطر ریسک پانچ باید هر دو پارامتر مقاومت نهایی (q_{peak}) در لایه ماسه‌ای و نیز مقاومت نهایی پس از نفوذ (q_{pp}) در لایه رسی مورد مطالعه قرار گیرد.



شکل ۲. مدل مفهومی برای روش projected area (PA)

محاسبه ظرفیت باربری اوج q_{peak}

روش منطقه پیش‌بینی شده یا بار گسترده^۱

ترزاقی و پک^۲ (۱۹۴۸)، بیان داشتند که بار پی از طریق ماسه به یک سطح باربری بزرگ‌تری در مرز لایه‌های ماسه و رس گسترده می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است. از این رو ظرفیت باربری اوج (q_{peak}) را می‌توان با در نظر گرفتن یک پی مجازی قرار گرفته در مرز دولایه ماسه و رس با قطر افزایش یافته به اندازه $D+2H_s \tan \alpha_p$ ، محاسبه نمود. به‌طوری‌که H_s ارتفاع لایه ماسه، D قطر اسپادکن و α_p زاویه گسترانیده شدن بار ناشی از پی در مرز دولایه ماسه و رس، نسبت به سطح عمودی است.

q_{peak} مربوط به پی دایره‌ای را می‌توان از رابطه (۱) تخمین زد:

$$q_{peak} = \left[\left(1 + 2 \frac{H_s}{D} \tan \alpha_p \right)^2 (s_c N_c s_{u0} + q_0) \right] - \left[\left(1 + 2 \frac{H_s}{D} \tan \alpha_p \right)^2 \gamma'_s H_s \right] \quad (1)$$

به‌طوری‌که s_c ضریب شکل برای پی دایره‌ای است و مقدار آن $1/2$ در نظر گرفته می‌شود، N_c ضریب ظرفیت باربری سطحی خاک رس، s_{u0} مقاومت خاک رس در مرز بین دولایه ماسه و رس، q_0 سربار وارده بر بالای ماسه و γ'_s وزن مخصوص مؤثر ماسه است. مشکل اصلی در روش Projected area (PA) یا Load spread این است که از مقاومت برشی لایه ماسه چشم‌پوشی می‌شود.

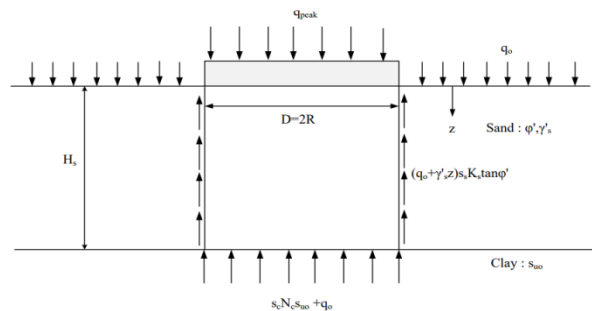
^۱ Load spread

^۲ Terzaghi and Peck

از این رو با کاربرد این روش، مقادیر ظرفیت باربری اوج کمتری نسبت به مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های سنتریفیوژ، برآورد می‌کند (ته، ۲۰۰۷؛ لی، ۲۰۰۹؛ و هوو و همکاران، ۲۰۱۴).

روش برش پانچ

در مدل برش پانچ ارائه شده توسط (هانا و میرهوف^۱ ۱۹۸۰)، فرض اساسی در نظر گرفتن یک سطح لغزش عمودی از میان ماسه، جایی که یک بلوک استوانه‌ای شکل از ماسه به درون لایه رسی زیرین برش پیدا می‌کند، بوده است که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. مدل مفهومی روش برش پانچ

بر اساس تعادل در جهت عمودی، مقدار ظرفیت باربری اوج را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد:

$$q_{\text{peak}} = (s_c N_c s_{u0} + q_0) + \left[2 \frac{H_s}{D} (\gamma'_s H_s + 2q_0) s_s K_s \tan \phi' \right] - \gamma'_s H_s \quad (2)$$

بخش اول معادله نماینده ظرفیت باربری خاک رس، بخش دوم بیانگر مقاومت برشی ماسه و بخش پایانی برای منظور کردن وزن مؤثر بلوک استوانه‌ای شکل ماسه است. s_s ضریب شکل است که برابر با ۱ فرض می‌گردد.

K_s ضریب برش پانچ است و از طریق رابطه زیر با ضریب فشار خاک پسیو (K_δ) مربوط می‌شود:

$$K_s \tan \phi' = K_\delta \tan \delta \quad (3)$$

δ زاویه اصطکاک بسیج شده در صفحه گسیختگی منحنی و در بازه $\phi'/2$ تا $3\phi'/4$ تغییر می‌کند و مقدار میانگین ($2\phi'/3$) برای آن پیشنهاد گردید (میرهوف^۲ ۱۹۷۴).

تاکنون مطالعات عددی با روش اجزاء محدود در این زمینه انجام شده است. گیو و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۰ پدیده نفوذ اسپادکن در سه نوع خاک با استفاده از تکنیک CEL موجود در نرم‌افزار آباکوس^۴ مدل‌سازی نمودند. ایشان سه نوع خاک شامل خاک رسی تک لایه - خاک ماسه‌ای تک لایه - خاک لایه‌بندی شده ماسه بر روی رس را در نظر گرفتند. در این تحقیق انواع تغییر شکل و سرعت جابه‌جایی ذرات خاک در اعماق مختلف برای حالت‌های مختلف لایه‌بندی خاک مشاهده گردید (هانسن^۵ ۱۹۷۰). گیو و هنکه^۶ (۲۰۱۱)، پدیده نفوذ اسپادکن را با استفاده از تکنیک^۷ CEL جهت بررسی تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای بالایی، زاویه اصطکاک ماسه و مقدار مقاومت برشی

¹ Hanna and Meyerhof

² Meyerhof

³ Qiu et al

⁴ Abaqus

⁵ Hansen

⁶ Qiu and Henke

⁷ Coupled Eulerian-Lagrangian

خاک رسی زیرین، بر روی ظرفیت باربری اسپادکن به انجام رسانند، نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش مقدار هر کدام از پارامترهای فوق الذکر باعث افزایش مقاومت باربری می شود (هوسین و همکاران^۱، ۲۰۰۳). گائو و همکاران^۲ (۲۰۱۲)، نفوذ پیوسته پی اسپادکن در خاک لایه بندی شده در دولایه به صورت لایه رسی قوی فوقانی بر روی لایه رسی ضعیف زیرین به وسیله تحلیل اجزاء محدود تغییر شکل های بزرگ با استفاده از نرم افزار آفینا^۳، شبیه سازی نمودند. نتایج تحقیق عبارت بودند از افزایش ضرایب باربری اوج (Q_{peak}) پی اسپادکن با افزایش نسبت مقاومت لایه پایینی به لایه بالایی، افزایش ضرایب باربری اوج پی اسپادکن با افزایش اندازه قطر اسپادکن در شرایطی که نسبت مقاومت لایه های خاک کمتر از ۰.۶ باشد، همچنین ضریب باربری اوج و پتانسیل گسیختگی پانچ با افزایش ضخامت لایه بالایی افزایش می یابد (هولزی و همکاران، ۲۰۰۳). بررسی ها نشان می دهد، اکثر تحقیقات صورت گرفته پیشین، به دنبال بهبود روش های موجود در پیش بینی نفوذ اسپادکن در شرایط قرارگیری لایه ماسه ای بر روی لایه رسی بوده است. در تحقیق حاضر تمرکز، بر روی بررسی گسیختگی پانچ ناشی از نفوذ پی اسپادکن در خاک لایه ای در شرایط تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی بیشتری مانند تأثیر خصوصیات لایه های ماسه ای و رسی از جمله تراکم نسبی (ID) و ضخامت لایه ماسه ای، مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (SU_0)، گردایان مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری اسپادکن با روش کوپل لاگرانژی - اویلری (CEL) بوده است که در تحقیقات قبل کمتر به آن ها پرداخته شده است.

روش پژوهش

امروزه روش های عددی می توانند ابزار خوبی برای تخمین ظرفیت باربری پی اسپادکن باشند. باین حال شبیه سازی فرآیند نفوذ عمیق یک پی اسپادکن در بستر دریا به دلیل مشکل همگرایی عددی ناشی از (۱) اعوجاج مش ها به دلیل تغییر شکل شدید، (۲) مصالح غیرخطی به دلیل رفتار پیچیده خاک، (۳) شرایط مرزی غیرخطی از جمله تماس اصطکاکی، احتیاج به استفاده از تکنیک هایی دارد که بتواند بر این مشکلات غلبه کند. بدین منظور در این تحقیق، شبیه سازی عددی به وسیله روش coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) انجام گرفته است. خاک به عنوان بخش اویلری و اسپادکن هم بخش لاگرانژی تکنیک CEL در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که چندین مسئله به وسیله گیو و همکاران^۴ (۲۰۱۱) به منظور سنجش دقت روش CEL، مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاصله حاصله نشان از توانایی این روش در حل مسائل عددی دربردارنده تغییر شکل های بزرگی که به کارگیری روش های اجزاء محدود کلاسیک نتایج قابل قبولی برای آن ها به دست نمی داد، داشت (هو و همکاران^۵، ۲۰۱۴). به منظور انجام تحقیق حاضر از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. این نرم افزار یک مجموعه از برنامه های مدل سازی بسیار توانمند است که مبتنی بر روش اجزاء محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدل سازی غیرخطی را دارا است. این نرم افزار دارای مجموعه المان های بسیار گسترده ای است که هر نوع هندسه ای را می توان به صورت مجازی توسط این المان ها مدل کرد. همچنین دارای مدل های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک ها، پلیمرها، کامپوزیت ها، بتن تقویت شده، فوم های فبری و نیز شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می سازد. نظر به اینکه Abaqus یک ابزار مدل سازی عمومی و گسترده است، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل های مکانیک جامدات و سازه (تنش- تغییر مکان) نمی شود. با استفاده از این نرم افزار می توان مسائل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، آکوستیک، مکانیک خاک و پیرو الکتریک را مورد مطالعه قرار داد.

¹ Hossain et al

² Gao et al

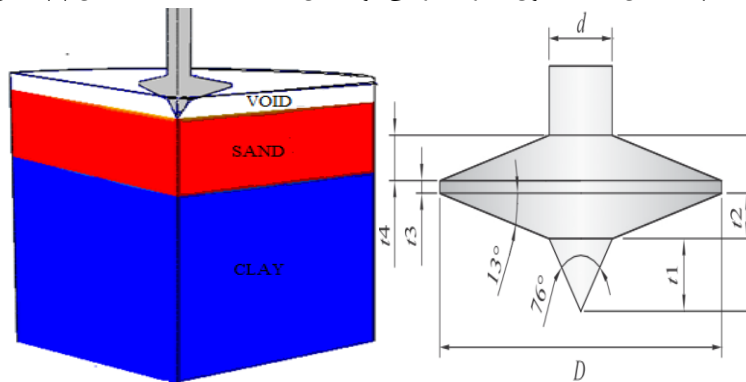
³ AFENA

⁴ Qiu et al

⁵ Hu et al

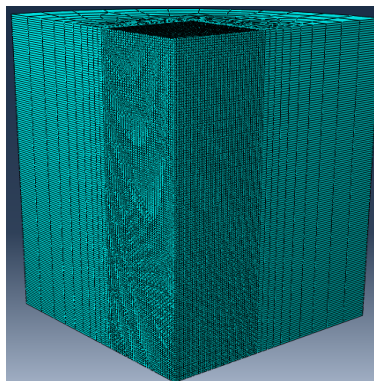
هندسه و مش بندی

هندسه خاک در یک دامنه اوپلری سه بعدی به وسیله المان‌هایی شش‌وجهی خطی از نوع EC3D8R مدل‌سازی گردید. هر المان اوپلری ۸ گره دارد و امکان اینکه چند ماده اوپلری هم‌زمان در آن وجود داشته باشد می‌دهد. لازم به ذکر است تا این لحظه برای روش اوپلری المان دوبعدی در آباکوس وجود ندارد. با توجه به تقارن هندسی مدل و برای کاهش زمان محاسبات، فقط یک‌چهارم کل مدل در تحلیل ۳ بعدی مدل‌سازی شد. همچنین لایه‌ای با ارتفاع کم و خالی از ماده در بالای لایه ماسه‌ای گرفته شده است تا حجمی از خاک اطراف اسپادکن که در حین نفوذ به سمت بالا جریان می‌یابند، به درون لایه خالی وارد شوند. همچنین اسپادکن به عنوان جسمی صلب مدل گردیده و هندسه آن مشابه اسپادکن جکاپ "Marathon LeTourneau Design, Class 82-SDC" در نظر گرفته شده است. هندسه کل مدل در شکل (۴) و هندسه اسپادکن در شکل (۵) نشان داده شده است. نفوذ اسپادکن در خاک به صورت جابه‌جایی کنترل شده با یک سرعت ثابت شبیه‌سازی گردیده است. لازم به ذکر است عمق $d = 0$ در حالتی در نظر گرفته شده که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن به سطح خاک می‌رسد. الگوی مش بندی مدل عددی حاضر به صورتی است که در یک فاصله افقی نزدیک به محدوده نفوذ که تغییرات بزرگ‌تر و مهم‌تر است اندازه سلول‌ها کوچک و ثابت و از آن فاصله تا انتهای مدل اندازه سلول‌ها بزرگ‌تر می‌شود. مدل شبکه‌بندی شده در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۴. هندسه کلی مدل نفوذ اسپادکن در خاک

شکل ۵. هندسه پی اسپادکن



شکل ۶. الگوی مش بندی هندسه خاک

مدل رفتاری و پارامترهای خاک

به منظور مدل سازی رفتار خاک های ماسه ای و رسی از مدل موهر-کلمب استفاده شد. مدل سازی تحت شرایط آب آزاد به وسیله تنش های مؤثر انجام گرفت. همچنین خاک ماسه ای تحت شرایط زهکشی شده و خاک رسی زهکشی نشده در نظر گرفته شد. تنش های ژئواستاتیکی ناشی از وزن مخصوص غوطه وری خاک قبل از نفوذ اسپادکن اعمال می شود، به همراه یک ضریب فشار جانبی برابر ۱ برای لایه رسی و $(1 - \sin \phi')$ برای لایه ماسه ای. ضریب پواسون (ν) را برای خاک رسی برابر ۰.۴۹ و برای خاک ماسه ای برابر ۰.۳ نظر گرفته شده است. همچنین از آنجایی که سختی خاک تأثیر کمی بر مقاومت نفوذ دارد، مدول یانگ (E) خاک رسی یک مقدار معمول برابر با 350 SU ، به طوری که SU مقاومت برشی خاک رسی است و همچنین مقداری برابر با ۲۵ مگا پاسکال برای خاک ماسه ای در نظر گرفته می شود. مقاومت برشی لایه رسی به صورت خطی نسبت به عمق افزایش می یابد به طوری که دیاگرام آن در شکل $b1$ نشان داده شده و رابطه (۲) برای آن وجود دارد:

$$s_{ui} = s_{um} + \rho z \quad (2)$$

به طوری که s_{um} مقاومت برشی موجود در مرز بین دولایه و ρ گرادیان مقاومت برشی لایه رسی و Z عمق خاک است.

سرعت نفوذ

نفوذ پی اسپادکن در خاک به صورت جابه جایی کنترل شده با یک سرعت ثابت شبیه سازی می گردد. با توجه به اینکه نفوذ اسپادکن در خاک یک تحلیل شبه استاتیکی محسوب می شود از این رو بایستی سرعت نفوذ به اندازه کافی کم باشد تا این ویژگی تحلیل برقرار شود و از اثرات اینرسی جلوگیری شود. همچنین با توجه به اینکه سرعت نفوذ به طور مستقیم بر روی زمان تحلیل تأثیرگذار است بایستی هزینه محاسباتی نیز در انتخاب سرعت در نظر گرفته شود.

شرایط تماس

اندرکنش بین مصالح اوپلری (خاک) و مصالح (لاگرانژی) اسپادکن به وسیله الگوریتم تماس عمومی^۱ تعریف می شود که از روش تماس نهایی^۲ استفاده می کند. بر اساس دستورالعمل سنام^۳ (۲۰۰۸) ضریب زبری بین اسپادکن و خاک های ماسه ای رسی (α) به ترتیب برابر ۰.۵ و ۰.۴ در نظر گرفته می شود (ایزو، ۲۰۱۲). قابل ذکر است که تماس اندرکنشی بین مصالح مختلف اوپلری (لایه های ماسه و رس) تعریف نمی شود چراکه مصالح به طور مداوم تغییر شکل می یابند و لغزشی بین آنها وجود ندارد.

در این تحقیق ابتدا دو مدل آزمایشگاهی با استفاده از مدل عددی شبیه سازی و نتایج حاصله با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید و سپس تعدادی مدل عددی دیگر جهت بررسی تأثیرات پارامترهای اساسی و مؤثر در ظرفیت باربری پی اسپادکن مورد تحلیل قرار گرفت. جزئیات سناریوهای مورد بررسی در این تحقیق شامل تأثیرات قطر اسپادکن (D)، ضخامت لایه ماسه ای (H_s)، تراکم نسبی لایه ماسه ای (I_D)، مقاومت برشی موجود در مرز بین دولایه (S_{u0})، گرادیان مقاومت برشی لایه رسی (ρ) بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن در جدول (۱) ارائه شده است.

¹ General Contact

² penalty contact

³ SNAME

⁴ ISO

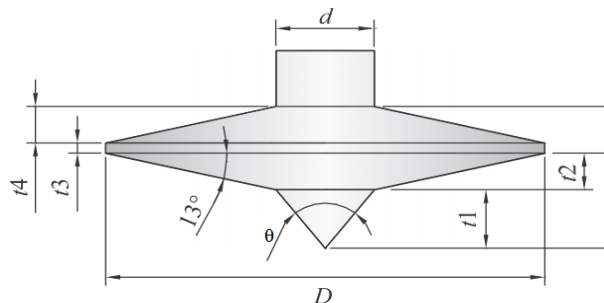
جدول ۱. سناریوهای تحقیق

تیپ اسپادکن	D (m)	I _D (%)	H _s (m)	ρ(kpa/m)	s _{u0} (kpa)	
B	۱۲	۴۳	۶	۱/۵۵	۱۱	
B	۱۲	۴۳	۷	۱/۵۵	۱۱	بررسی تأثیر ضخامت
B	۱۲	۴۳	۸	۱/۵۵	۱۱	لایه ماسه‌ای H _s
B	۱۲	۴۳	۷	۱/۵۵	۱۱	بررسی تأثیر مقاومت
B	۱۲	۴۳	۷	۱/۵۵	۱۵	برشی موجود در مرز
B	۱۲	۴۳	۷	۱/۵۵	۲۰	بین دولایه S _{u0}
D	۱۰	۴۳	۷	۱	۱۱	بررسی تأثیر گرادبان
D	۱۰	۴۳	۷	۱/۵۵	۱۱	مقاومت برشی لایه
D	۱۰	۴۳	۷	۲	۱۱	رسی ρ
A	۱۰	۲۰	۷	۱/۵۵	۱۱	
A	۱۰	۴۰	۷	۱/۵۵	۱۱	بررسی تأثیر تراکم
A	۱۰	۶۰	۷	۱/۵۵	۱۱	نسبی I _D

صحت سنجی و کالیبراسیون

به منظور صحت سنجی نتایج به دست آمده در این تحقیق، ۲ مدل آزمایشگاهی از تحقیقات تجربی صورت گرفته توسط (هو و همکاران^۱ ۲۰۱۴)، به وسیله مدل نرم افزاری حاضر در این پژوهش به صورت عددی مدل سازی و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. مدل های آزمایشگاهی مورد نظر به صورت سیستم خاک دولایه ای ماسه بر روی رس هستند که لایه خاک ماسه ای دارای تراکم نسبی برابر ۴۳ درصد، وزن مخصوص مؤثر برابر ۹.۹۶ کیلو نیوتن بر مترمکعب و ضخامت برابر ۶ متر است. لایه خاک رسی دارای مشخصاتی از جمله مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (S_{u0}) برابر ۱۲.۹۶ کیلو پاسکال، گرادبان مقاومت برشی برابر ۱.۵۴ کیلو پاسکال بر متر و وزن مخصوص مؤثر برابر ۷۱۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب است. پی اسپادکن در این دو آزمایش دارای فرم کلی نشان داده شده در شکل (۷) و جزئیات ارائه شده در جدول (۲) است.

¹ Hu et al



شکل ۷. هندسه اسپادکن مورد استفاده در آزمایش تجربی (هو و همکاران، ۲۰۱۴)

جدول ۲. ابعاد اسپادکن مورد استفاده در آزمایش تجربی (هو و همکاران، ۲۰۱۴)

اسپادکن	t_1	t_2	t_3	t_4	D	d	θ
مدل ۱	۱/۴۴	۰/۸۹	۰/۳	۰/۸۱	۱۰	۲/۹۲	۷۶°
مدل ۲	۱/۷۳	۱/۰۷	۰/۳	۱/۰۷	۱۲	۲/۹۲	۷۶°

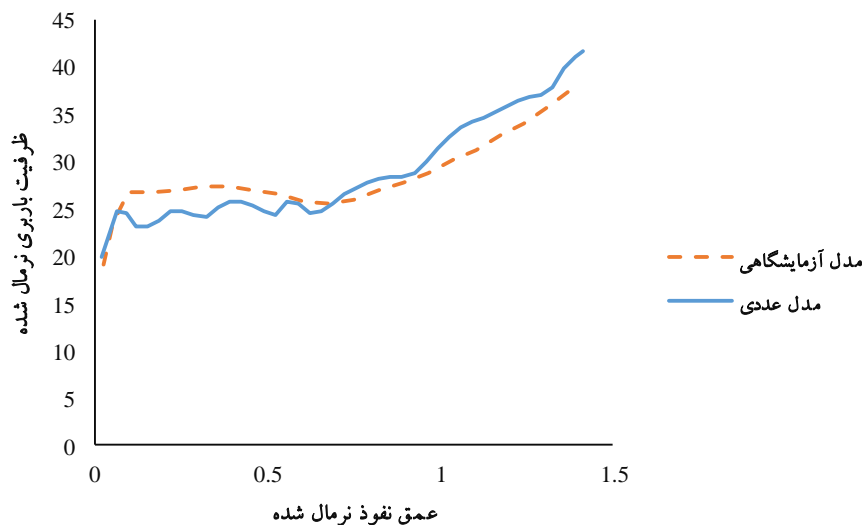
درصد خطای مقدار نفوذ پانچ محاسبه شده مربوط به هر کدام از مدل ها با اندازه مش مربوطه در جدول (۳) ارائه گردیده است.

جدول ۳. مقایسه میان درصد خطای مدل آزمایشگاهی و درصد خطا برای هر مدل

مدل آزمایشگاهی	درصد خطا	اندازه مش	درصد خطا
مدل آزمایشگاهی ۱	۰/۵	۰/۴	۰/۳
درصد خطا	%۱۲	%۱۰	%۷
مدل آزمایشگاهی ۲	۰/۵	۰/۴	۰/۳
درصد خطا	%۱۳	%۹	%۵

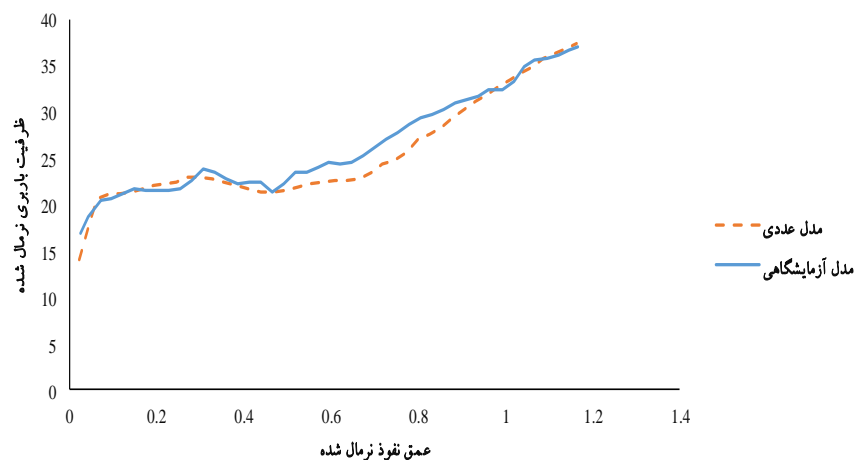
در نهایت با توجه به خروجی ها و درصد خطای به دست آمده برای مدل ها با اندازه مش های متفاوت، برای محدوده ای برابر با قطر اسپادکن و نزدیک به نفوذ، ابعاد مش ۰/۳ متر و از این فاصله تا انتهای مدل (فاصله شعاعی) اندازه مش از ۰/۷ تا ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. مورد قابل ذکر دیگر مربوط به سرعت نفوذ پی اسپادکن است که با توجه به اینکه مدل سازی حاضر از نوع تحلیل شبه استاتیکی است می بایست طوری انتخاب شود که این ویژگی شبه استاتیکی برقرار شود و اثرات اینرسی خنثی گردد، همچنین باید هزینه های محاسباتی تحلیل (زمان تحلیل) نیز به صرفه باشد، بنابراین با توجه به بازه ۰.۱ تا ۱ متر بر ثانیه که در تحقیقات مشابه برای نفوذ پی اسپادکن در نظر گرفته شده است، برای این ۲ مدل سرعت های ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲ متر بر ثانیه اعمال شد و با انجام مقایسه، سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه نتیجه قابل قبولی به دست می داد. به طوری که برای مدل ۱ و مدل ۲ خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری به ترتیب برابر با ۷٪ و ۵٪ است. نکته قابل ذکر، محاسبه خطا

به صورت میانگین خطای تعداد زیادی نقطه از نمودارهای نتایج آزمایشگاهی و عددی است. در نمودارهای (۸) و (۹) مقایسه صورت گرفته بین مدل های آزمایشگاهی و نرم افزاری نشان داده شده است.



شکل ۸. نمودار مقایسه نتایج آزمایش تجربی و نرم افزاری برای مدل ۱

همان گونه که از شکل (۸) مشخص است در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی پدیده نفوذ پانچ اتفاق می افتد. به طوری که برای مدل آزمایشگاهی محدوده گسیختگی حدوداً از عمق $0/9$ متر تا عمق $8/5$ متری اتفاق می افتد در حالی که برای مدل عددی محدوده گسیختگی از عمق حدوداً $0/9$ سانتی متر تا عمق $7/3$ متر اتفاق می افتد؛ بنابراین مدل عددی، محدوده گسیختگی پانچ را با دقت قابل قبولی پیش بینی می کند، بعلاوه اینکه مقادیر مقاومت باربری پی اسپادکن را نیز با مقدار خطای برابر با 7 درصد پیش بینی می کند.



شکل ۹. نمودار مقایسه نتایج آزمایش تجربی و نرم افزاری برای مدل ۲

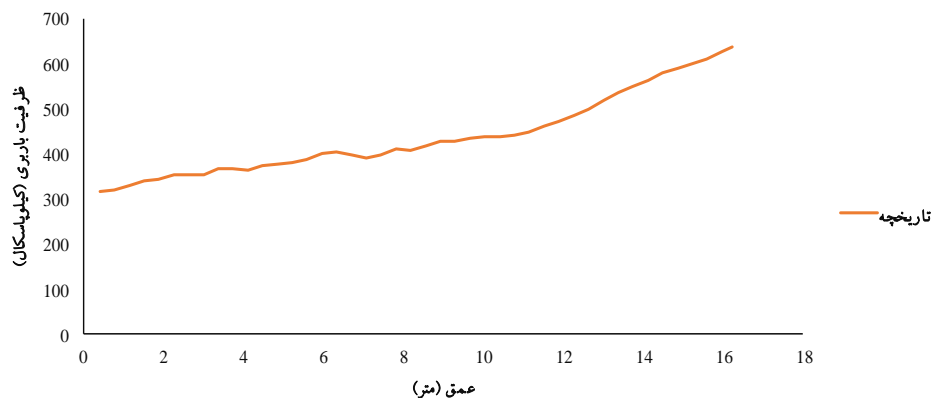
همان گونه که از شکل (۹) مشخص است همانند مدل ۱، برای مدل ۲ نیز در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی پدیده نفوذ پانچ اتفاق می افتد. به طوری که برای مدل آزمایشگاهی گسیختگی حدوداً از عمق ۰/۸ متر تا عمق ۸/۲ متری و برای مدل عددی گسیختگی از عمق حدوداً ۰/۴ متر تا عمق ۷/۴ متر اتفاق می افتد؛ بنابراین مدل عددی، محدوده گسیختگی پانچ را با دقت قابل قبولی پیش بینی می کند، بعلاوه اینکه مقادیر مقاومت باربری پی اسپادکن را نیز با مقدار خطای برابر با ۵ درصد پیش بینی می کند.

همچنین به منظور انجام کالیبراسیون با تغییر ضرایب مختلف، مدل حاضر با استفاده از داده های ارائه شده مربوط به یک مورد نفوذ پایه سکوی جکاپ در بستر خلیج تایلند، کالیبره می گردد. خاک مورد نظر دارای ساختار لایه ای به صورت لایه رس سخت - لایه رس نرم - لایه رس سخت هست. همچنین قطر اسپادکن برابر با ۱۱/۵ متر هست. در جدول (۴) مشخصات خاک ارائه گردیده است.

جدول ۴. مشخصات خاک مورد نظر در عملیات نفوذ در خلیج تایلند

خاک	وزن مخصوص مؤثر (γ) (kN/m^3)	مقاومت برشی (s_u) (kpa)	ضخامت لایه (t) (m)
لایه اول	۸	۶۵	۹
لایه دوم	۸	۳۵	۵
لایه سوم	۸	۸۰	بی نهایت

مقادیر اندازه گیری شده میدانی در این عملیات نشان می دهد که پی های اسپادکن در فاصله اعماق ۵/۷۵ تا ۷۰۱۵ متر، تحت پیش بارگذاری به اندازه ۳۹۴/۸ کیلو پاسکال، مستقر می شوند.



شکل ۱۰. نمودار مقاومت-عمق، مدل عددی نفوذ پی اسپادکن در خلیج تایلند

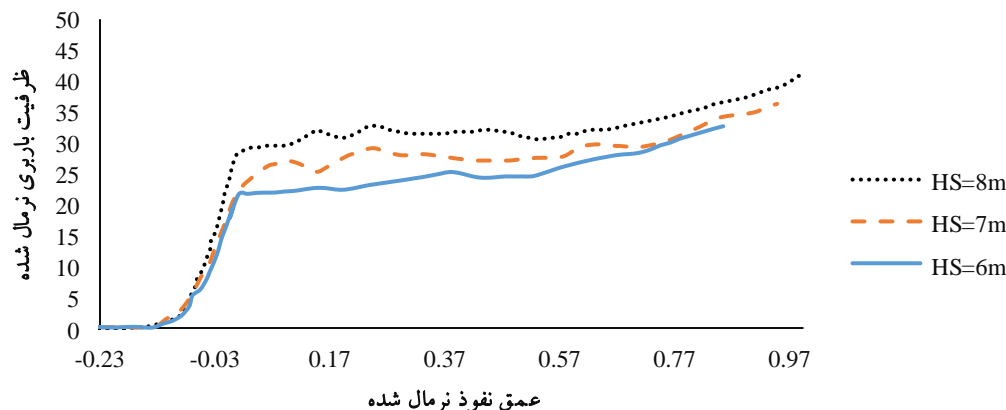
همان گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می شود، مدل عددی نتایج قابل قبولی به دست می دهد چرا که در عمقی برابر با ۶/۴ متر که نزدیک به عمق نفوذ نهایی پی های اسپادکن در مورد میدانی است، مقاومت باربری اوجی برابر با ۴۰۸ کیلو پاسکال به دست می دهد که ۳/۳٪ بیشتر از مقدار اندازه گیری شده است.

یافته ها

در این بخش نتایج حاصل از اجرای سناریوهای مختلف بر روی مقاومت باربری پی اسپادکن و حجم خاک ماسه‌ای منتقل شده^۱ به درون لایه رسی توسط اسپادکن بررسی می‌گردد.

بررسی تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای

در شکل (۱۱)، تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای بر مقاومت باربری پی اسپادکن نشان داده شده است.



شکل ۱۱. تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای بر مقاومت باربری پی اسپادکن

با توجه به شکل (۱۱)، پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که برای تحلیل شامل لایه‌ی ماسه‌ای با ضخامت ۶ متر، گسیختگی در محدوده‌ی با عمق ۰/۴ متر تا ۶/۴ متر اتفاق می‌افتد. این محدوده برای تحلیل‌های شامل لایه ماسه‌ای با ضخامت ۷ متر و ۸ متر به ترتیب برابر ۰/۶ متر تا ۸ متر و ۰/۴ متر تا ۸ متر خواهد بود. با توجه به نمودار فوق، ضخامت لایه ماسه‌ای تأثیر مشهودی بر روی مقاومت نفوذ دارد. به طوری که هر چه لایه‌ی ماسه‌ای ضخیم‌تر باشد، مقاومت نفوذ بیشتر خواهد بود. هر کدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله ۲.۸- تا ۰، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پانچ است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت. این نتیجه در تطابق با نتایج به دست آمده از تحقیق آزمایشگاهی (ته و همکاران ۲۰۰۸، و تحقیق‌های عددی (جون و همکاران^۲ ۲۰۰۷ و یو و همکاران^۳ ۲۰۰۹ که بر روی خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، انجام گرفت، است که در جدول (۵) نشان داده شده است. دلیل این نتایج ناشی از مقادیر و اندازه منابع تأمین‌کننده q_{peak} (مقاومت اوج) است. به عبارتی برای مقادیر بزرگ‌تر H_s ، لایه‌ی ماسه‌ای (که مقاومت بیشتری نسبت به

¹ sand plug

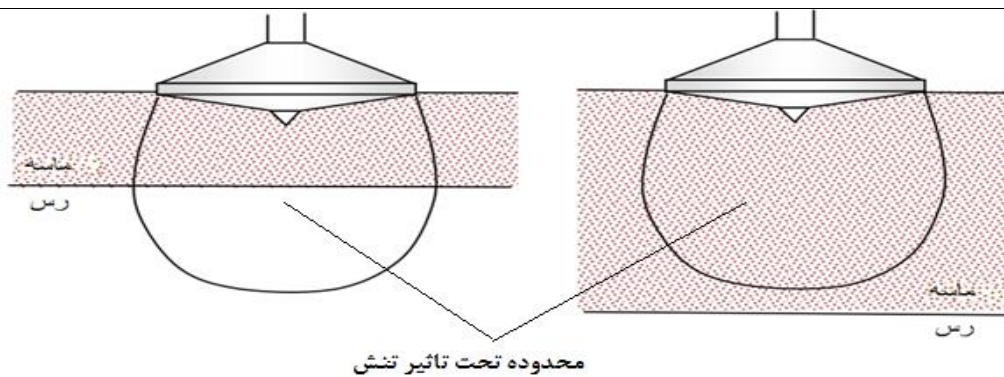
² Xu et al

³ Yu et al

لایه رسی دارد) سهم اصلی در تأمین q_{peak} دارد. برعکس، برای شرایطی که لایه ماسه‌ای نازک‌تر باشد سهم لایه رسی در مقاومت باربری غالب است و در نتیجه مقاومت کمتری بسیج می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت لایه ماسه‌ای بخش بزرگ‌تری از محدوده تحت تأثیر تنش، در لایه ماسه‌ای خواهد بود و بخش کمتری در لایه رسی، از این رو مقاومت q_{peak} بیشتری به دست می‌آید. در شکل (۱۲) این موضوع به خوبی نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای (H_s) بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن

q_{peak} (kpa)	H_s (m)	
۲۲۰	۳	
۵۴۸	۵	ته و همکاران ۲۰۰۸
۱۰۵۰	۷	
۱۷۰	۷	
۳۵۶	۱۴	یو و همکاران ۲۰۱۲
۴۴۴	۷	
۱۶۲۵	۱۴	جون و همکاران ۲۰۱۴
۲۶۳	۶	
۳۰۷	۷	تحقیق حاضر
۳۴۶	۸	

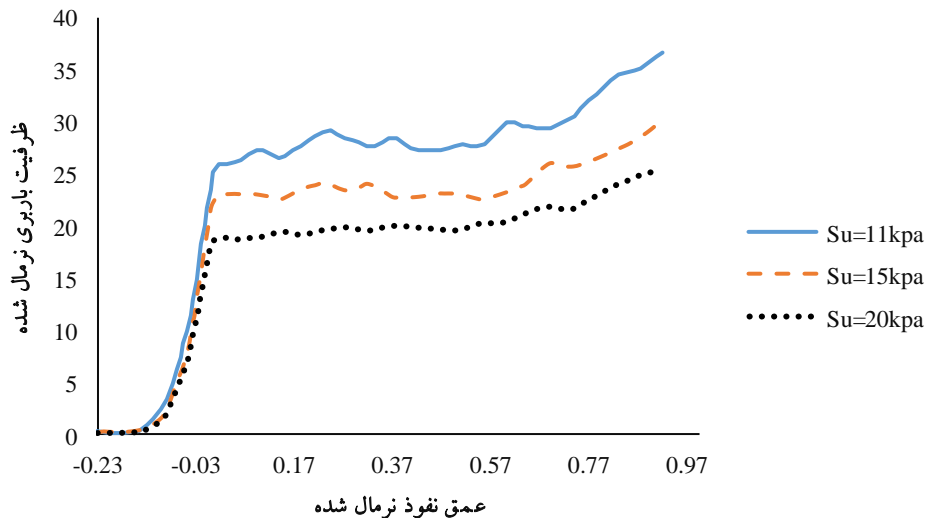


شکل ۱۲. طرح شماتیک گسترش محدوده تحت تأثیر تنش در لایه‌های خاک برای ضخامت‌های مختلف لایه ماسه‌ای

بررسی تأثیر مقاومت برشی لایه رسی

بررسی تأثیر مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (su_0) بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

در شکل (۱۳)، نتایج تأثیر مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن نشان داده شده است.



شکل ۱۳. تأثیر مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن

با توجه به شکل (۱۳)، پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تحلیل‌های شامل $Su0$ برابر $11kpa$ ، $15kpa$ و $20kpa$ به ترتیب برابر با $0/6$ متر تا 8 متر، $0/6$ متر تا $7/6$ متر، $0/6$ متر تا $6/8$ متر خواهد بود. همچنین با توجه به نمودار فوق، با افزایش مقاومت برشی $Su0$ ، مقاومت باربری پی افزایش می‌یابد. هرکدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله $2/8 - 0$ تا 0 ، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پانچ است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت.

با توجه به شکل (۱۳)، هرچه قدر مقاومت برشی $Su0$ بزرگ‌تر باشد، مقاومت باربری در طول کل عملیات نفوذ بزرگ‌تر خواهد بود. این نتیجه در تطابق با نتیجه به دست آمده از تحقیقات عددی (کیو و هنکه^۱، ۲۰۱۱؛ جون و همکاران^۲، ۲۰۰۷؛ یو و همکاران^۳، ۲۰۰۹) که بر روی خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، انجام گرفت، است که در جدول (۶) نشان داده شده است. با توجه به اینکه بخشی از مقاومت باربری خاک توسط لایه رسی تأمین می‌شود، با افزایش مقاومت برشی این لایه، مقاومت کلی نیز افزایش می‌یابد که این در تطابق با تمامی روابط تئوری ذکر شده است.

¹ Qiu and Henke

² Xu et al

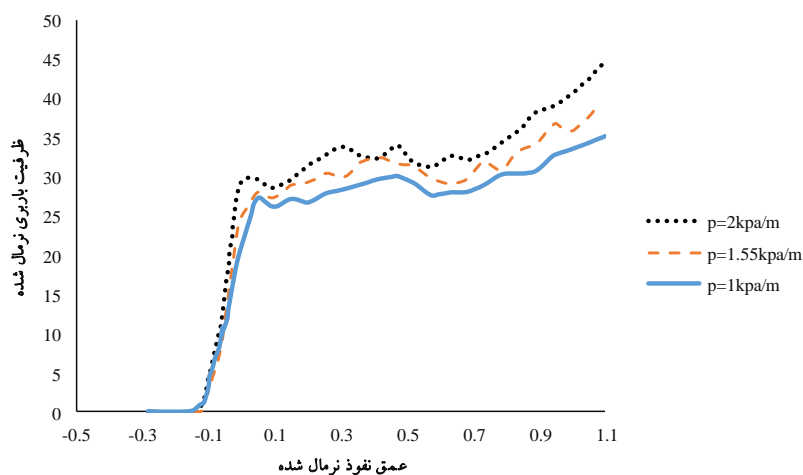
³ Yu et al

جدول ۶. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (s_{u0}) بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن

q_{peak} (kpa)	s_{u0} (kpa)	
۵۳۹	۳۰	
۷۳۳	۵۰	کیو و هنکه ۲۰۱۱
۱۱۹۴	۱۰۰	
۳۵۷	۱۰	
۶۰۸	۳۰	یو و همکاران ۲۰۰۹
۸۳۱	۵۰	
۴۰۴	۱۰	
۵۵۱	۲۰	جون و همکاران ۲۰۰۷
۸۰۱	۴۰	
۳۰۷	۱۱	
۳۴۷	۱۵	تحقیق حاضر
۳۹۰	۲۰	

بررسی تأثیر گرادیان مقاومت برشی لایه رسی (ρ) بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

در این بخش تأثیر گرادیان مقاومت برشی لایه رسی بر ظرفیت باربری پی اسپادکن مورد بررسی می‌گیرد و نتایج حاصل در قالب شکل (۱۴) ارائه می‌گردد.



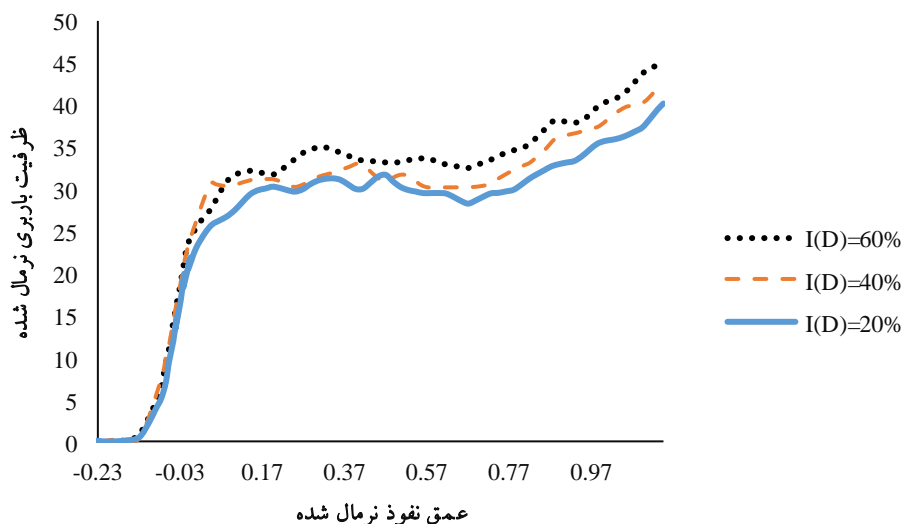
شکل ۱۴. تأثیر گرادیان مقاومت برشی لایه رسی بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

با توجه به شکل (۱۴)، پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پنج برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تحلیل‌های شامل p برابر با 1 kPa/m ، 1.55 kPa/m ، 2 kPa/m به ترتیب برابر با 0.6 متر تا 8 متر، 0.6 متر تا 8 متر، 0.4 متر تا 7.6 متر است. با توجه به نمودار فوق، با افزایش مقدار گردبان مقاومت برشی خاک رس، مقاومت باربری خاک نیز افزایش می‌یابد. همچنین در محدوده نفوذ در لایه رسی، هرچه قدر گردبان مقاومت برشی بزرگ‌تر باشد، نرخ افزایش مقاومت باربری متناظر بزرگ‌تر خواهد بود. هرکدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله $2/8$ تا 0 ، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پنج است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت.

بررسی تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای

بررسی تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای (ID) بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

در شکل (۱۵) نتایج بررسی تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای بر ظرفیت باربری پی نشان داده شده است.



شکل ۱۵. تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای بر ظرفیت باربری پی

با توجه به شکل (۱۵)، پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پنج برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تراکم نسبی برابر با 20% ، 40% و 60% به ترتیب برابر است با 0.9 متر تا $1/1$ متر، 0.5 متر تا $1/1$ متر، $1/1$ متر تا $7/5$ متر است. با توجه به نمودار فوق، با افزایش میزان تراکم نسبی لایه ماسه‌ای، مقاومت باربری نیز افزایش می‌یابد. هرکدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله $2/3$ تا 0 ، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پنج است. بخش سوم و

آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت.

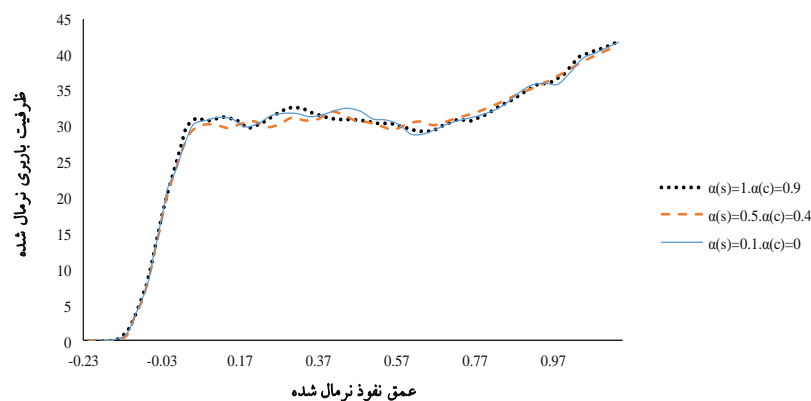
با توجه به شکل (۱۵)، با افزایش میزان تراکم نسبی، مقاومت باربری نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه در تطابق با نتیجه به دست آمده از تحقیق آزمایشگاهی (کاریگ و چوا^۱ ۱۹۹۰) و تحقیق عددی (کیو و همکاران^۲ ۲۰۱۰) که بر روی خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، انجام گرفت، است جدول (۶). دلیل این امر این است که با توجه به افزایش تراکم نسبی خاک ماسه‌ای و در نتیجه افزایش زاویه اصطکاک آن، سهم مقاومت صفحه برشی موجود در لایه ماسه‌ای، در تأمین مقاومت q_{peak} افزایش می‌یابد.

جدول ۶. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای (I_D) بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن

q_{peak} (kpa)	I_D	
۳۳۱	% ۲۴	کاریگ و چوا ۱۹۹۰
۵۴۳	% ۸۹	
۳۷۰	% ۲۰	
۳۹۴	% ۵۰	کیو و همکاران ۲۰۱۰
۴۹۷	% ۸۵	
۳۲۸	% ۲۰	
۳۴۳	% ۴۰	تحقیق حاضر
۳۶۷	% ۶۰	

بررسی تأثیر زبری بین خاک و اسپادکن (α) بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

در شکل (۱۶) نتایج بررسی تأثیر زبری بین خاک و اسپادکن بر ظرفیت باربری پی نشان داده شده است.



شکل ۱۶. تأثیر زبری بین خاک و اسپادکن بر ظرفیت باربری پی

¹ Craig and Chua

² Qiu et al

با توجه به شکل (۱۶) پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تحلیل‌های شامل پی اسپادکن با زبری α_c (زبری بین رس و پی) و α_s (زبری بین ماسه و پی) برابر با (۰ و ۰/۱)، (۰/۴ و ۰/۵) و (۰/۹ و ۱) به ترتیب برابر با ۱/۱ متر تا ۸/۱ متر، ۱/۱ متر تا ۷/۷ متر، ۰/۹ متر تا ۸/۱ متر است. همچنین با توجه به نمودار فوق، زبری بین پی اسپادکن و خاک‌های موجود، تأثیر خاصی بر روی مقاومت باربری ندارد. هرکدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله ۲/۳- تا ۰، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پانچ است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت. با توجه به شکل (۱۶)، زبری پی اسپادکن آن چنان تأثیری بر روی مقاومت باربری ندارد. این نتیجه در تطابق با نتیجه تحقیق عددی (کیو و آنکه^۱، ۲۰۱۱) که در آن تحلیل تأثیر زبری پی اسپادکن را بر روی خاک‌های تک لایه‌ای رس و ماسه انجام داد، است که در جدول (۷) نشان داده شده است. دلیل این امر به خاطر نیمه متراکم بودن لایه ماسه‌ای و در نتیجه ایجاد اصطکاک ناچیز بین پی و خاک ماسه‌ای است.

جدول ۷. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر زبری بین خاک و اسپادکن (α) بر روی ظرفیت باربری آن

q (kpa)	α_c	d(m)
۳۱۸	۰/۵	
۳۲۶	rough	۱
۳۶۲	۰/۵	
۳۶۹	rough	۲
۴۰۰	۰/۵	
۴۰۷	rough	۳
		کیو و هنکه ^۲ ۲۰۱۱
q (kpa)	α_s	d(m)
۳۰۴۸	۰/۵	
۳۱۳۲	rough	۱
۳۷۲۲	۰/۵	
۳۸۴۵	rough	۱/۵
۴۴۰۳	۰/۵	
۴۶۰۲	rough	۲
q_{peak} (kpa)	α_c	α_s
۳۴۳	۰	۰/۱
۳۴۱	۰/۴	۰/۵
۳۴۲	۰/۹	۱

^۱ Qiu and Henke

^۲ Qiu and Henke

بحث

در تحقیق حاضر، اقدام به مطالعه عددی بررسی ظرفیت باربری پی اسپادکن سازه جکاپ فراساحلی در خاک، با سیستم دولایه‌ای ماسه بر روی رس، با روش کوپل لاگراژتی - اویلری (CEL) گردید. در این پژوهش تأثیر خصوصیات لایه‌های ماسه‌ای و رسی از جمله تراکم نسبی (ID) و ضخامت لایه ماسه‌ای، مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (Su0)، گرادیان مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری و پدیده گسیختگی پانچ مورد مطالعه قرار گرفت در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی رفتار خاک‌های ماسه‌ای و رسی از مدل موهر-کلمب استفاده گردید.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش عددی و تکنیک CEL فرایند نفوذ پی اسپادکن در خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس مدل‌سازی گردید. برای سیستم خاک دولایه‌ای ماسه بر روی رس، در صورتی که عملیات پیش بارگذاری در نصب سکوی جکاپ به دقت و با بررسی‌های کامل و جامع محیطی و ژئوتکنیکی انجام نگردد و میزان بارگذاری بیش از حد مجاز اعمال شود، پتانسیل گسیختگی پانچ وجود دارد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ✓ پارامترهای مرتبط با خصوصیات ژئوتکنیکی شامل مقاومت برشی لایه رسی، گرادیان مقاومت برشی، تراکم نسبی لایه ماسه‌ای، ضخامت لایه‌ی ماسه‌ای نسبت مستقیمی با مقاومت باربری پی اسپادکن دارند. به طوری که با افزایش هر کدام از این خصوصیات، مقاومت باربری نیز افزایش می‌یابد.
- ✓ شدت و ریسک گسیختگی پانچ با افزایش ضخامت لایه ماسه‌ای و کاهش مقاومت برشی لایه رسی افزایش می‌یابد.
- ✓ الگوی گسیختگی خاک زیر پی اسپادکن در حال نفوذ، نسبت به عمق تغییر می‌کند، به گونه‌ای که در عمق‌های سطحی، گسیختگی دارای دو مولفه، برش در طول صفحه برشی تقریباً عمودی در لایه ماسه‌ای و گسیختگی برشی موضعی در لایه رسی، است.

تقدیر و تشکر

در پایان از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر که شرایط لازم برای ایجاد تحقیق را در اختیار نویسندگان قرار دادند، سپاسگزاری می‌گردد.

References

- Craig, W. H., & Chua, K. (1990). Deep penetration of spudcan foundations on sand and clay. *Geotechnique*, 40(4), 541-556. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.4.541>
- Dier, A., Carrol, B., & Abolfathi, S. (2004). Guidelines For Jack Up Rigs with Particular Reference to Foundation Integrity, Health and Safety Executive (HSE). Research Report 289, UK, 1-91. <https://www.hse.gov.uk/Research/rrhtm/rr289.html>
- Drescher, A., & Detournay, E. (1993). Limit load in translational failure mechanisms for associative and non- associative materials. *Geotechnique*, 43(3), 443-456. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.443>
- Gao, W., Yu, L., & Hu, Y. (2012). Large deformation FE analysis of large diameter spudcan penetration into two-layer of uniform clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6(2), 171-177. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2012.06.02.171-177>
- Gerwick, B. C. (1986). Construction of offshore structures. John Wiley, New York. <https://doi.org/10.1201/9780849330520>
- Hanna, A. M., & Meyerhof, G. G. (1980). Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay. *Can. Geotech. J.*, 17(2), 300-303. <https://doi.org/10.1139/t80-030>
- Hansen, J. B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. *Bulleting of the danish geotechnical institute*, 28, 5-11. <https://www.semanticscholar.org>
- Hossain, M. S., Hu, Y., & Randolph, M. F. (2003). Spudcan foundation penetration into uniform clay. *Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, May 25-30,

- Honolulu, Hawaii, USA. <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE03/All-ISOPE03/ISOPE-I-03-177/8446>
- Houlsby, G. T., & Martin, C. M., (2003). Undrained bearing capacity factors for conical footings on clay. *Geotechnique*, 53(5), 513-520. <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:e3b491f0-4a72-4881-85d0-e1b512bdc618>
- Hu, P., Stanier, S. A., Cassidy, M. J., & Wang, D. (2014). Predicting peak resistance of
- Hu, P., Stanier, S., Cassidy, M., & Wang, D. (2014). Predicting Peak Resistance of Spudcan Penetrating Sand Overlying Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001016)
- ISO. (2012). ISO 19905-1: Petroleum and natural gas industries-site specific assessment of mobile offshore units-part 1 : Jack-ups. Geneva, Switzerland : International Organization for
- Lee, K. K. (2009). Investigation of potential spudcan punch- through failure on sand overlying clay soils. PhD thesis, University of Western Australia, Perth. https://api.research-repository.uwa.edu.au/ws/portalfiles/portal/3220219/Lee_Kok_Kuen_2009.pdf
- Lee, K. K., Randolph, M. F., & Cassidy, M. J. (2013). Bearing capacity on sand overlying clay soils: A simplified conceptual model. *Geotechnique*, 63(15), 1285-1297. <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.176>
- Liu, J., Yu, L., Zhou, H., & Kong, X. J. (2014). Bearing Capacity and Critical Punch-Through Depth of Spudcan on Sand Overlying Clay. *China Ocean Eng*, 28(1), 139 – 147. <https://doi.org/10.1007/s13344-014-0011-x>
- Meyerhof, G. G. (1974). Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay. *Can. Geotech. J*, 11(2), 223-229. <https://doi.org/10.1139/t74-018>
- Qiu, G., & Henke, S. (2011). Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay. *Marine Structures*, 24(4), 528–550. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.06.005>
- Qiu, G., Henke, S., & Grabe, J. (2010). 3D FE analysis of the installation process of spudcan foundations. In 2nd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth WA, 685–690. <http://hdl.handle.net/11420/12144>
- SNAME. (2008). SNAME: Recommended practice for site specific assessment of mobile jack-up units. T & r bulletin 5-5a 1st edn, rev 3. Alexandria, VA, USA: Society of Naval Architects and Marine Engineers. <https://pdfcoffee.com/sname-5-5-and-5-5-arev3-pdf-free.html>
- spudcan penetrating sand overlying clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001016)
- Standardization. <https://www.iso.org/standard/34592.html>
- Teh, K. L. (2007). Punch- through of spudcan foundation on sand overlying clay. PhD thesis, National University of Singapore. <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/28149>
- Teh, K. L., Cassidy, M. J., Leung, C. F., Chow, Y. K., Randolph, M. F., & Quah, C. K. (2008). Revealing the bearing failure mechanisms of a penetrating spudcan through sand overlying clay. *Geotechnique*, 58(10), 793–804. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.10.793>
- Teh, K. L., Leung, C. F., Chow, Y. K., & Handidjaja, P. (2009). Prediction of punch-through for spudcan penetration in sand overlying clay. *Offshore Technology Conference, OTC20060*. <https://doi.org/10.4043/OTC-20060-MS>
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. London: Chapman and Hall. <https://doi.org/10.4043/OTC-20060-MS>
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. New York, John Wiley & Sons. <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1289570>
- Xu, X. (2007). Investigation of the end bearing performance of displacement piles in sand. PhD thesis, University of Western Australia. <https://research-repository.uwa.edu.au/en/publications/investigation-of-the-end-bearing-performance-of-displacement-pile>

Yu, L., Hu, Y., & Liu, J. (2009). Spudcan penetration in loose sand over uniform clay. Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31 - June 5, Honolulu, Hawaii, USA. <https://doi.org/10.1115/OMAE2009-79214>