



Numerical Investigation of the Effect of Internal Friction Angle, Cohesion, and Clay Compaction on the Bearing Capacity of Under-Reamed Piles Using 3D FEM

Hossein Sarbaz¹, Masoud KHahanipour²

1. Department of Civil Engineering, TN.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: dr.sabaz@iau.ac.ir

2. Department of Civil Engineering, TN.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: masoud.khahanipour@iau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

2026-05-21

Received in revised form

2026-06-10

Accepted

2026-06-30

Available online

2026-07-01

Keywords:

Belled pile,
Bearing capacity,
PLAXIS 3D,
Clay soil,
cohesion

ABSTRACT

Under-reamed pile, due to their protrusions along the cross-section, exhibit higher bearing capacity compared to conventional piles and are considered an efficient solution for foundation construction on weak soils, particularly clayey soils. This study investigates the influence of geotechnical parameters, including internal friction angle, cohesion, and clay compaction, on the compressive bearing capacity of a Under-reamed pile using PLAXIS 3D finite element software. For this purpose, a concrete piled raft with a length of 10 m and a diameter of 0.7 m was modeled in four different soil types (loose clay, semi-dense clay, dense clay, and alluvial soil of Isfahan). The effects of varying cohesion (30-90 kPa) and internal friction angle (15-45°) were analyzed separately. Results indicate that an increase in clay density significantly enhances the bearing capacity of the Under-reamed pile, such that the bearing capacity in dense clay is more than six times that in loose clay. Additionally, increasing cohesion from 30 to 90 kPa leads to an approximate 62% increase in bearing capacity, while increasing the internal friction angle from 15° to 45° results in about a 59% increase. Validation of the numerical results against previous studies shows excellent agreement. Overall, among the parameters investigated, soil type has the most pronounced effect, whereas internal friction angle has the least influence on the bearing capacity of Under-reamed pile.

Cite this article: Sarbaz, Hossein., & Khahanipour, Masoud. (2026). Numerical Investigation of the Effect of Internal Friction Angle, Cohesion, and Clay Compaction on the Bearing Capacity of Under-Reamed Piles Using 3D FEM. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(1), 213-232.

DOI:10.22126/amcen.2026.13958.1085



© The Author(s).

DOI:10.22126/amcen.2026.13958.1085

Publisher: Razi University

Introduction

Under-reamed piles, also known as belled piles, are cast-in-situ concrete piles with one or more enlarged bulbous sections along their length. These protrusions provide significantly higher bearing capacity compared to conventional uniform-section piles, making them an efficient foundation solution for weak soils, particularly clayey soils [1, 2]. The enlarged bulbs act as anchors against tensile forces and increase both the end-bearing and skin friction resistance under compressive loads [3,4].

Despite their advantages, the influence of geotechnical parameters—specifically internal friction angle, cohesion, and soil compaction—on the compressive bearing capacity of under-reamed piles in clay soils has not been comprehensively investigated. Previous studies have largely focused on granular soils (sands) or on the tensile (uplift) capacity of these piles [5,6]. Moreover, most existing research has examined the effect of each parameter separately, with limited attention to the combined influence of soil type, cohesion, and friction angle on compressive behavior [7,8].

The present study aims to fill this gap by systematically investigating the individual and combined effects of three key geotechnical parameters—clay compaction (density), cohesion (C), and internal friction angle (ϕ)—on the compressive bearing capacity of a single under-reamed pile. This research provides empirical relationships for preliminary estimation of bearing capacity in clayey soils.

Method

A three-dimensional numerical model was developed using the finite element software PLAXIS 3D. The model consisted of a single concrete under-reamed pile with a length of 10 m and a shaft diameter of 0.7 m. The bulb diameter was set at 2.5 times the shaft diameter, and the bulb was located 1 m above the pile tip, following standard design recommendations [9].

Soil Models: Four different soil types were modeled to represent a wide range of clay conditions:

- Loose clay ($C = 17$ kPa, $\phi = 18^\circ$, $E_m = 15,000$ kPa)
- Semi-dense clay ($C = 45$ kPa, $\phi = 25^\circ$, $E_m = 35,000$ kPa)
- Isfahan alluvial soil ($C = 50$ kPa, $\phi = 35^\circ$, $E_m = 65,000$ kPa)
- Dense clay ($C = 95$ kPa, $\phi = 32^\circ$, $E_m = 75,000$ kPa)

The soil was modeled using the elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb constitutive model. A fixed interface factor ($R_{inter} = 0.7$) was applied at the pile-soil interface to simulate friction along the pile shaft. Model boundaries were set at $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ in plan and 20 m in depth based on a sensitivity analysis ensuring boundary effects remained below 3%.

Parametric Study: In addition to varying soil type, the study independently varied cohesion (30, 50, 70, and 90 kPa) while keeping other parameters constant, and internal friction angle (15° , 25° , 35° , and 45°) with other parameters held constant. The ultimate bearing capacity (Q_u) was determined as the load corresponding to a pile head settlement of 25 mm [5].

Validation: The numerical model was validated against the results of Mardani et al. (2021) [10] for a 6 m long under-reamed pile in clay, showing excellent agreement in the load-settlement curve up to a settlement of 50 mm.

Results

Effect of Soil Compaction (Soil Type)

Load-settlement curves for the four soil types showed that bearing capacity increased dramatically with soil density. The ultimate bearing capacities were:

- Loose clay: 925 kN
- Semi-dense clay: 2,518 kN
- Isfahan soil: 4,018 kN
- Dense clay: 5,722 kN

This represents an increase of over 519% (more than 6 times) from loose to dense clay. A linear relationship was found: $Q_u = 1589 I_c + 677$, where I_c is the compaction index ($R^2 = 0.987$).

Effect of Cohesion (C)

Increasing cohesion from 30 to 90 kPa resulted in a bearing capacity increase from 3,289 to 5,334 kN—an increase of approximately 62%. The relationship was linear: $Q_u = 34.08 C + 2262$ ($R^2 = 0.999$). The rate of increase, however, showed a declining trend: 729 kN (30→50 kPa), 692 kN (50→70 kPa), and 624 kN (70→90 kPa), indicating diminishing returns from cohesion at higher values.

Effect of Internal Friction Angle (ϕ)

Increasing the internal friction angle from 15° to 45° raised bearing capacity from 2,902 to 4,605 kN—an increase of approximately 59%. The linear relationship was $Q_u = 37.87 \phi + 2323$ ($R^2 = 0.996$). Similar to cohesion, the incremental rate of increase declined at higher friction angles, with 572 kN (15→25°), 544 kN (25→35°), and 487 kN (35→45°).

Comparative Influence

Among the three parameters, soil compaction had the most pronounced effect, followed by cohesion, with internal friction angle having the smallest influence. The regression coefficients (slopes) confirmed this ranking: I_c (1589) > C (34.08) > ϕ (37.87). All empirical equations showed high coefficients of determination ($R^2 \geq 0.987$), demonstrating excellent fit.

Conclusions

1. Compaction Effect: Increasing clay density from loose to dense increases the bearing capacity of under-reamed piles by over 6 times (519%), making soil type the most critical design parameter.
2. Cohesion Effect: A 60 kPa increase in cohesion (30 to 90 kPa) enhances bearing capacity by approximately 62%, though the benefit diminishes at higher cohesion levels.
3. Friction Angle Effect: A 30° increase in internal friction angle (15° to 45°) raises bearing capacity by approximately 59%, with similarly diminishing returns.
4. Ranking of Influence: Soil compaction > Cohesion > Internal friction angle. Under-reamed piles are highly sensitive to geotechnical conditions; changes in any parameter can significantly affect ultimate bearing capacity.

5. Empirical Relationships: The derived linear relationships (with $R^2 \geq 0.987$) provide practical preliminary estimates for engineers designing under-reamed piles in clayey soils within the studied parameter ranges.

6. Limitations: The empirical equations are based on simplifying assumptions, including homogeneous and isotropic soil conditions, decoupled single-parameter analysis, and neglect of simultaneous parameter interactions. Results should be interpreted cautiously and used for preliminary estimation only.

Recommendations for Future Research: Investigation of the effects of bulb number and spacing, tensile loading, pile group behavior, and groundwater table on under-reamed pile performance in clayey soils using numerical methods is recommended.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی عددی تاثیر زاویه اصطکاک داخلی، ضریب چسبندگی و تراکم خاک رسی بر ظرفیت باربری شمع پافیلی به روش المان محدود سه بعدی

حسین سرباز^۱، مسعود خواهانی پور^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد تهران شمال، تهران، ایران. رایانامه: dr.sabaz@iaiu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد تهران شمال، تهران، ایران. رایانامه: masoud.khahanipour@iaiu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

شمع‌های پافیلی به دلیل داشتن برآمدگی‌هایی در مقطع خود، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به شمع‌های معمولی دارند و گزینه‌ای کارآمد برای پی‌سازی در خاک‌های ضعیف به‌ویژه خاک‌های رسی محسوب می‌شوند. در پژوهش حاضر، اثر پارامترهای ژئوتکنیکی شامل زاویه اصطکاک داخلی، ضریب چسبندگی و تراکم خاک بر ظرفیت باربری فشاری شمع پافیلی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 3D مورد بررسی قرار گرفته است. بدین‌منظور، یک شمع پافیلی بتنی به طول ۱۰ متر و قطر ۰/۷ متر در چهار نوع خاک متفاوت (رس سست، رس نیمه‌متراکم، رس متراکم و خاک آبرفتی اصفهان) مدل‌سازی شد. همچنین تأثیر تغییرات ضریب چسبندگی (۳۰ تا ۹۰ کیلو پاسکال) و زاویه اصطکاک داخلی (۱۵ تا ۴۵ درجه) به‌صورت جداگانه تحلیل گردید. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر تراکم خاک بر ظرفیت باربری شمع پافیلی به‌طور چشمگیری بیشتر از دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی است، به‌گونه‌ای که افزایش تراکم از حالت رس سست به متراکم، ظرفیت باربری را بیش از ۶ برابر افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش چسبندگی از ۳۰ به ۹۰ کیلو پاسکال و افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۱۵ به ۴۵ درجه، به ترتیب تنها حدود ۶۲ و ۵۹ درصد افزایش در ظرفیت باربری ایجاد می‌کنند به عبارت دیگر، تأثیر تراکم خاک حدود ۱۰ برابر تأثیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بر ظرفیت باربری شمع پافیلی در خاک‌های رسی مورد مطالعه هست.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۲/۳۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۴/۰۹

تاریخ انتشار:

۱۴۰۵/۰۴/۱۰

کلیدواژه‌ها:

شمع پافیلی،

خاک رس،

ظرفیت باربری،

چسبندگی،

زاویه اصطکاک داخلی

استناد: سرباز، حسین؛ خواهانی پور، مسعود. (۱۴۰۵). بررسی عددی تاثیر زاویه اصطکاک داخلی، ضریب چسبندگی و تراکم خاک رسی بر ظرفیت باربری شمع پافیلی به روش المان محدود سه بعدی. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۱)، ۲۳۲-۲۱۳.

DOI:10.22126/amcen.2026.13958.1085



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

وسیعی از کشور را خاک‌های رسی پوشانده است ضروری به نظر می‌رسد که بررسی‌های بیشتری روی این نوع خاک انجام شود، در پژوهش حاضر از خاک رسی در سه حالت سست و با تراکم متوسط و متراکم استفاده خواهد شد. همچنین اثر پارامترهای ژئوتکنیکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) بر عملکرد این نوع شمع‌ها بررسی گردید برخلاف اکثر مطالعات گذشته که دامنه بررسی محققین را عمدتاً به ظرفیت باربری کششی این نوع شمع‌ها محدود ساخته‌اند، در پژوهش پیش رو ظرفیت باربری فشاری آن‌ها نیز به صورت کمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف این مقاله، تحلیل اثرات این پارامترها بر عملکرد شمع‌های پافیلی با استفاده از روش‌های عددی و مدل‌سازی است.

با توجه به اهمیت بهبود عملکرد و چالش‌های موجود در طراحی شمع‌ها در خاک‌های ضعیف، نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای عملی مؤثری برای مهندسان طراح باشد.

۲. مروری بر پیشینه تحقیق

مطالعات پیرامون شمع‌های پافیلی^۱ به اوایل دهه ۱۹۴۰ میلادی در ایالت تگزاس آمریکا بازمی‌گردد، جایی که این شمع‌ها برای مقابله با خاک‌های متورم‌شونده به کار گرفته شدند در هندوستان از دهه ۴۰ میلادی این شمع‌ها در نوعی خاک رس متورم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اولین مطالعات سیستماتیک بر روی این شمع‌ها در سال ۱۹۴۹ میلادی در آفریقای جنوبی و توسط جنینگز و هنکل^۲ [۲] انجام گرفت. مطالعه جنینگز و هنکل به وسیله محقق استرالیایی به نام تاسکر^۳ ادامه یافت [۱]. پس از آن گوالیت (۱۹۷۶) مطالعات گسترده‌ای را بر روی شمع‌های پافیلی انجام داد. او سپس مطالعات خود را در سال ۲۰۰۹ تکمیل کرد [۱]. در ادامه، مارتین و همکاران [۳] با انجام آزمایش‌های بارگذاری بر روی دوحبابه^۴ در خاک رس نشان دادند که این نوع شمع، جایگزینی مناسب برای شمع‌های معمولی در خاک‌های رس پیش‌تحکیم‌یافته سخت است، هرچند بر لزوم تعیین فاصله بهینه

در ساخت و سازه‌های مدرن، استفاده از شمع‌ها به‌عنوان یکی از اجزای اساسی پی‌سازی، به‌خصوص در خاک‌های ضعیف و مناطق با ویژگی‌های خاص ژئوتکنیکی ضروری است. شمع‌های پافیلی به‌عنوان نوعی از شمع‌ها، با داشتن برآمدگی‌هایی در انتهای مقطع خود، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به شمع‌های معمولی دارند. این شمع‌ها به‌ویژه در خاک‌هایی با خصوصیات خاص مانند خاک‌های رسی، در بارگذاری‌های کششی قابل توجه یا مناطق با عمق کم (ضخامت کم خاک روی شمع) کاربرد دارند. در تحقیق حاضر، تأثیر شرایط ژئوتکنیکی و تراکم خاک بر باربری و نشست این نوع شمع‌ها بررسی شده است.

در مهندسی ژئوتکنیک، طراحی و انتخاب مناسب روش‌های پی‌سازی به‌ویژه در خاک‌های ضعیف، نقش مهمی در پایداری بستر سازه‌ها ایفا می‌کند. یکی از راهکارهای مرسوم در بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست، بهره‌گیری از شمع‌های باربر است. شمع‌های پافیلی که به دلیل هندسه غیریکنواخت و افزایش سطح جانبی مقطع شناخته می‌شوند، در سال‌های اخیر به‌عنوان جایگزینی کارآمد برای شمع‌های سنتی مطرح شده‌اند [۱،۳،۷،۱۲]. شمع‌های پافیلی با ایجاد ناحیه‌های پهن‌شده در انتهای طول خود، تغییرات قابل توجهی در رفتار مقاومت خاک ایجاد می‌کنند؛ افزایش سطح تماس با خاک، افزایش ظرفیت باربری کششی و توزیع بار بهتر، از مهم‌ترین مزایای این نوع شمع‌هاست. با این حال، تأثیر دقیق پارامترهای ژئوتکنیکی مختلف خاک (نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) به‌صورت همزمان بر عملکرد شمع‌های پافیلی هنوز کمتر در منابع علمی بررسی نشده است.

در این پژوهش، با استفاده از تحلیل عددی در PLAXIS 3D Foundation، رفتار شمع‌های پافیلی در خاک‌های با مشخصات ژئوتکنیکی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و شرایط ژئوتکنیکی خاک بر روی ظرفیت باربری و میزان نشست مطالعه شده است.

با توجه به بررسی سوابق موجود مشخص شد که اکثر پژوهش‌های داخلی انجام گرفته بر روی خاک دانه‌ای انجام شده است، زیرا خاک‌های دانه‌ای به دلیل عدم وجود چسبندگی، ظرفیت باربری کششی بسیار ضعیفی دارند و استفاده از شمع‌های پافیلی در این خاک‌ها با چالش جدی بالارانش مواجه است. با توجه به اینکه پهنه

¹ Under-reamed piles

² Jennings & Henkel

³ Tasker

⁴ Double under-reamed

سه‌بخشی برای این شمع‌ها تحت شرایط اشباع ارائه دادند. یافته‌های ایشان نشان می‌دهد که افزایش سطح آب زیرزمینی با تغییر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک اطراف حباب و شکل (ریخت‌شناسی) سطح گسیختگی، باعث کاهش مقاومت بالارانش می‌گردد. ژو و همکاران [۱۵] با بهره‌گیری از مدل‌های نیمه‌شفاف، موفق به مشاهده مستقیم مکانیزم گسیختگی شدند و زاویه بهینه پهن‌شدگی بین ۱۵ تا ۲۰ درجه را معرفی نمودند، که ظرفیت باربری نهایی را تا ۲۰۵ درصد افزایش می‌دهد. در حوزه روش‌های تحلیل، داده‌یچ و همکاران [۱۶] با استفاده از مدل رگرسیون درخت تصمیم، خطای تخمین ظرفیت بالارانش را به ۰/۰۲ کیلو نیوتن کاهش دادند. در شرایط بارگذاری پیچیده، ساکر و همکاران [۱۷] عملکرد برتر شمع‌های دوحبابه را تحت بارکششی مایل اثبات کردند. از سوی دیگر، ژانگ و همکاران [۱۸] نشان دادند که در شمع‌های بلند تحت بار جانبی (مانند شالوده توربین‌های بادی)، تأثیر پهن‌شدگی انتهایی ناچیز است. نهایتاً، ناریلیل و همکاران [۲۰، ۱۹] با معرفی نسل جدیدی به نام شمع‌های چندحبابه^۶ کوچک، گام بلندی در بهینه‌سازی مصرف مصالح با حفظ ظرفیت باربری بالا برداشتند؛ همچنین معرفی شمع نیمه حباب در قالب شمع پافیلی دو حبابه گزینه‌ای مقرون به‌صرفه است، که ترکیبی از ظرفیت کششی بالا و صرفه‌جویی در مواد مصرفی را ارائه می‌دهد. بررسی سوابق پژوهش نشان می‌دهد که اکثر مطالعات انجام‌گرفته عمدتاً بر روی خاک‌های دانه‌ای (ماسه‌ای) متمرکز بوده و در مواردی نیز به خاک‌های رسی پرداخته‌اند [۲۰، ۱۴]، کمتر به بررسی همزمان اثر سه پارامتر جنس خاک (با درجات مختلف تراکم)، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر ظرفیت باربری فشاری شمع‌های پافیلی با استفاده از ظرفیت‌های روش اجزای محدود توجه شده است. به عبارت دیگر، اگرچه مطالعات متعددی به‌طور جداگانه به تأثیر هر یک از این پارامترها پرداخته‌اند [۲۰، ۱۹، ۱۲]، اما تحلیلی که به‌صورت یکپارچه و در قالب یک مدل عددی سه‌بعدی، اثر همزمان و مقایسه‌ای این سه دسته پارامتر را بر ظرفیت باربری فشاری شمع پافیلی مورد بررسی قرار داده باشد، در منابع مشاهده نمی‌شود. در پژوهش حاضر از خاک رسی در سه

حباب‌ها تأکید کردند. شارما^۵ [۴] نیز با معرفی سازوکار عملکرد حباب به‌عنوان یک لنگر در برابر نیروهای کششی، گام مهمی در درک رفتار این شمع‌ها برداشت.

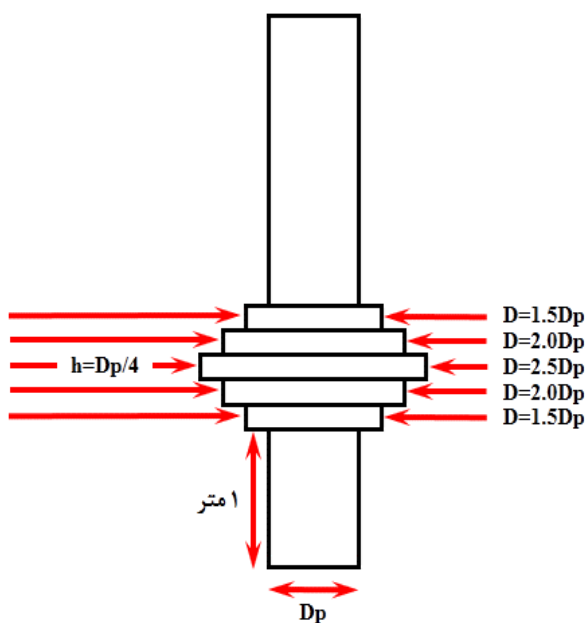
در دهه‌های بعد، تحقیقات با گسترش روش‌های تجربی و عددی دنبال شد. آنی پتر و همکاران [۵] با انجام آزمایش‌های بارگذاری کششی بر روی شمع‌های پافیلی بتنی، مقاومت قابل توجه این شمع‌ها در برابر کشش را اثبات کردند. در همین راستا، نانان و همکاران [۶] با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Ansys در خاک چسبنده، دریافتند که ایجاد یک حباب با افزایش ۲۵ درصدی حجم شمع، به ترتیب باعث افزایش ۲۶۲ درصدی ظرفیت فشاری و ۱۱۲۴ درصدی ظرفیت کششی می‌گردد. همچنین تاند و همکاران [۷] همخوانی نتایج آزمایشات میدانی (صحرايي) و آزمایشگاهی با تحلیل اجزای محدود را تأیید کردند. در داخل کشور، مکارچیان و سنکایان [۸] با طراحی یک دستگاه بارگذاری ویژه، به بررسی پارامترهایی نظیر طول مدفون، قطر شمع و دانسیته نسبی ماسه بر نیروی بالارانش شمع‌های پافیلی پرداختند و نتیجه گرفتند که نیروی نهایی بالارانش با افزایش طول مدفون، افزایش می‌یابد. یکی از محورهای اساسی پژوهش‌ها، مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی قطر و حباب بر ظرفیت باربری بوده است [۹]. گوپتا و همکاران [۱۰] نشان دادند که در خاک رسی، نزدیکی رطوبت به حد روانی می‌تواند باعث کاهش چشمگیر مقاومت کششی شود. نها و همکاران [۱۱] با مطالعات پارامتریک، افزایش خطی ظرفیت کششی را با افزایش طول، قطر شمع و مدول یانگ خاک گزارش کردند. در زمینه گروه شمع، علی‌الهی و همکاران [۱۲] با استفاده از نرم‌افزار Plaxis3D Foundation نشان دادند که گروه پنج‌تایی با فاصله ۱۰ برابر قطر و چیدمان پنج‌ضلعی، بهترین ظرفیت باربری کششی را دارد. همچنین مردانی و همکاران [۱۳] با ادامه این تحقیقات، دریافتند شمع‌های پافیلی با مقطع مربعی از ظرفیت فشاری بیشتری نسبت به مقاطع دایره‌ای برخوردارند.

تحقیقات یک دهه اخیر تحول چشمگیری در این حوزه ایجاد کرده است. لی و همکاران [۱۴] با در نظر گرفتن تأثیر سطح آب زیرزمینی بر عملکرد برکش شمع‌های پافیلی، مکانیزم گسیختگی

⁶ Multi-tiny bulb⁵Sharma, D

است، برابر با $0/7$ در نظر گرفته شده است. البته لازم به ذکر است مقدار این ضریب بستگی مستقیم به نوع خاک و نحوه اجرای سازه در تماس با خاک دارد، ولی برای یکسان بودن شرایط و امکان مقایسه بین حالت‌های مختلف این مقدار ثابت و یکسان در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش در حالت پایه از یک شمع پافیلی به طول 10 متر و قطر $0/7$ متر برای مدل‌سازی بهره گرفته شد. در شکل (۱) ترسیمی شماتیک از شمع پافیلی نشان داده شده است. در این پژوهش با تغییرات ایجاد شده در تراکم خاک، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، به بررسی این تغییرات در ظرفیت باربری قائم شمع پافیلی پرداخته شده است. برای محاسبه ظرفیت باربری قائم مطابق مطالعات محققین [۲۱] نشست 25 میلی‌متر (در خاک رسی) به‌عنوان ملاک محاسبه ظرفیت باربری در نظر گرفته شده است. همچنین بر اساس مرجع طراحی شمع‌های پافیلی نوشته شده توسط شارما و همکاران [۲۲] قطر حباب $2/5$ برابر قطر بدنه شمع در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. ترسیم شماتیک از شمع پافیلی و ابعاد موجود در مدل‌سازی‌های عددی

حالت سست و با تراکم متوسط و متراکم استفاده خواهد شد. همچنین اثر پارامترهای ژئوتکنیکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) بر عملکرد این نوع شمع‌ها بررسی گردید در پژوهش پیش رو ظرفیت باربری فشاری آن‌ها نیز به صورت کمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف این مقاله، تحلیل اثرات این پارامترها بر عملکرد شمع‌های پافیلی با استفاده از روش‌های عددی و مدل‌سازی است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ و ارائه روابط تجربی برای تخمین سریع ظرفیت باربری در خاک‌های رسی انجام گرفته است.

۳. روش‌شناسی نحوه اجرای تحقیق

نرم‌افزار مورد استفاده در پژوهش حاضر بسته تجاری PLAXIS 3D Foundation هست. از این نرم‌افزار برای انجام تحلیل‌های پارامتری استفاده می‌شود. این نرم‌افزار کاربرد وسیعی در تحلیل شرایط مختلف ژئوتکنیکی دارد و به وسیله آن می‌توان در گستره‌ای وسیع، بسیاری از مسائل پیچیده اندرکنش بین خاک و سازه را مورد شبیه‌سازی قرارداد. به وسیله این نرم‌افزار می‌توان شمع‌های مختلف، با شکل‌های پیچیده و گوناگون و تحت شرایط متفاوت را مدل‌سازی نموده و نیز می‌توان شمع‌های معمولی و پافیلی را با طول‌های مختلف و در شرایط مختلف خاک مدل‌سازی نمود در این پژوهش به بررسی اثر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و جنس خاک بر ظرفیت باربری شمع پافیلی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 3D Foundation پرداخته شده است.

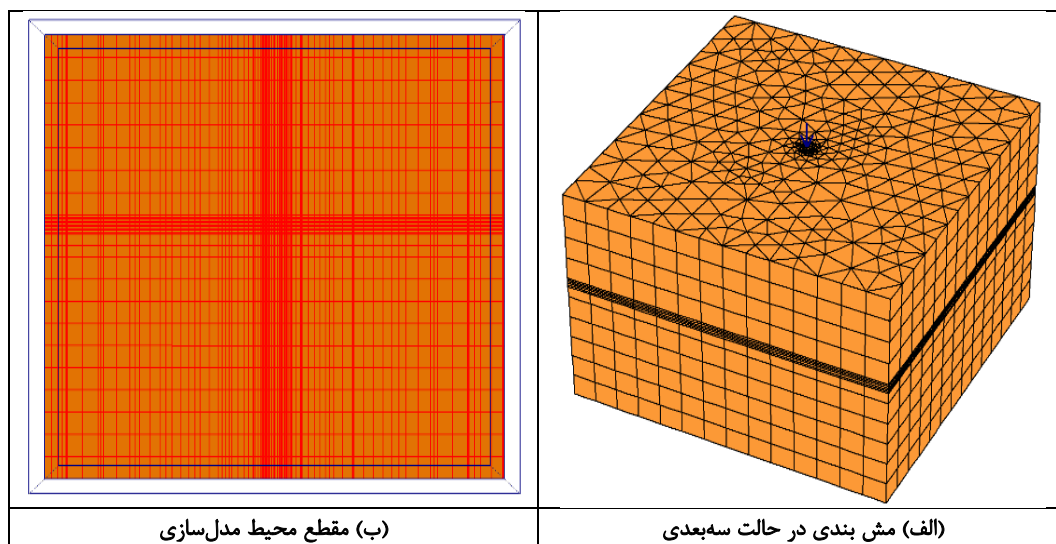
ظرفیت باربری شمع پافیلی تحت اثر هر یک از خصوصیت‌های متغیر، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. برای مدل‌سازی موردنظر از خاک یک لایه و مدل رفتاری ارتجاعی-خمیری کامل مور-کولمب برای محیط خاکی بهره گرفته شد و برای حصول دقت کافی در مدل‌سازی، شبکه‌بندی مناسب برای تحلیل صحیح مدنظر قرار گرفت. برای مدل‌سازی از یک الگوی ثابت با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) برای پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌ی خاک و همچنین مشخصات بتن مورد استفاده در شمع پافیلی در حالت پایه، استفاده شد. ضریب اندرکنش مابین فصل مشترک توده خاک و شمع که در اینجا سطح تماس بین خاک و بتن (شمع پافیلی)

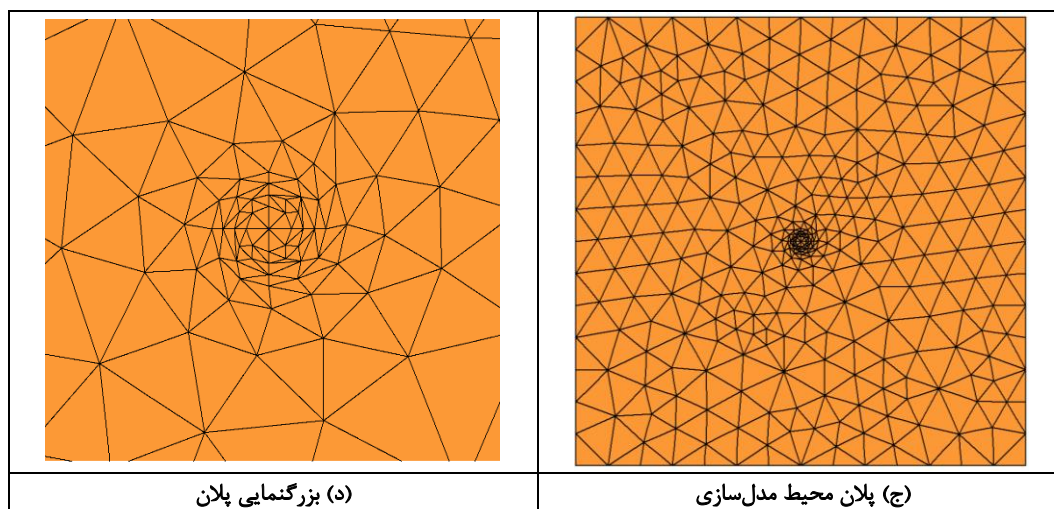
جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک و بتن در حالت تعریف مدل پایه

R_{inter}	ν	γ_t^8 (kN/m^3)	E_m^7 (kN/m^2)	ϕ (درجه)	C (kN/m^2)	لایه‌ی خاکی
۰/۷	۰/۳	۲۱	$6/5 \times 10^4$	۳۵	۵۰	خاک حالت پایه (خاک اصفهان)
-	۰/۲	۲۴	$3/25 \times 10^7$	-	-	بتن مسلح در شمع پافیلی

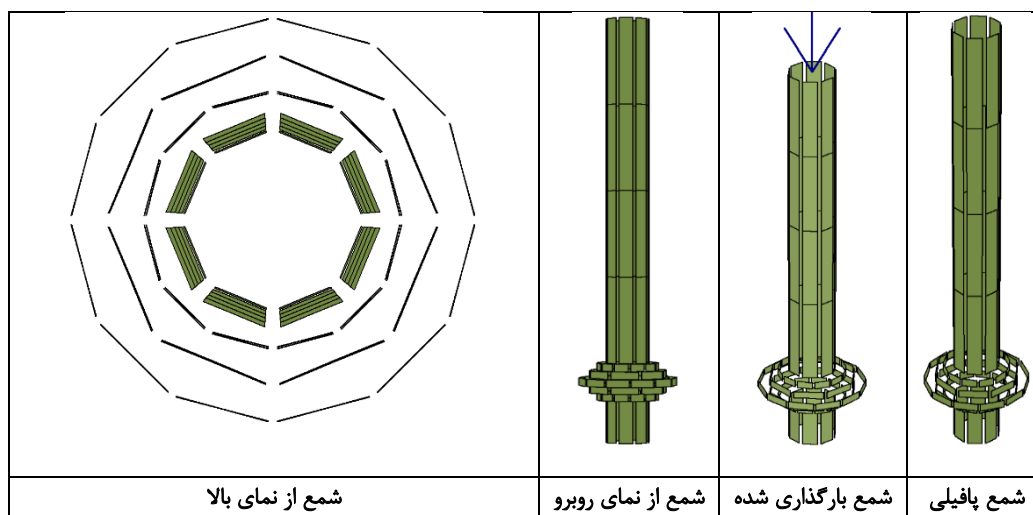
نسبت پواسون و ضریب اندرکنش مابین فصل مشترک توده خاک و شمع می‌باشند. تحلیل نرم‌افزار در نواحی نزدیک به المان‌های شمع است. در مدل‌سازی‌های انجام شده تعداد المان‌ها و تعداد گره‌ها در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی به ترتیب در حدود ۹۰۰۰ المان و ۲۵۰۰۰ گره است. همچنین اندازه‌ی متوسط هرکدام از المان‌ها در فضای مدل‌سازی در حدود ۱/۴۳ متر در نظر گرفته شده است. (شکل ۲ و شکل ۳)

در جدول فوق، C ، ϕ ، E_m ، ν و R_{inter} به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول شکل‌پذیری، وزن مخصوص طبیعی، از آنجا که یکی از مهم‌ترین عوامل در مسائل اجزای محدود نحوه‌ی شبکه‌بندی محیط مورد بررسی است، ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب نقش مؤثری در حل مسئله دارد. باید توجه داشت که الزاماً با ریزتر کردن شبکه‌بندی، جواب دقیق‌تری حاصل نمی‌شود و گاهی در این حالت خطاهای مشهودی مشاهده می‌شود. برای افزایش دقت مدل‌سازی، ناحیه نزدیک المان شمع پافیلی شبکه‌بندی ریزتری نسبت به نواحی دورتر دارد. دلیل این نوع شبکه‌بندی، تمرکز دقت





شکل ۲. مش بندی فضای مدل سازی در نرم افزار



شکل ۳. نحوه مش بندی شمع پافیلی در نرم افزار

پافیلی در جدول (۲) ذکر شده است و در هر سری مدل سازی، تنها یک پارامتر متغیر در نظر گرفته شده و سایر پارامترها ثابت نگه داشته شدند. ملاک تعیین ظرفیت باربری نهایی، بار متناظر با نشست ۲۵ میلی متر بر اساس منحنی های نیرو-جابجایی استخراج شده از نرم افزار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در راستای تکمیل اهداف این پژوهش، مدل سازی های متعدد سه بعدی در محیط نرم افزار PLAXIS 3D انجام پذیرفت. خصوصیات سازه ای مدل ذکر شده در جدول (۲) ارائه شده است و

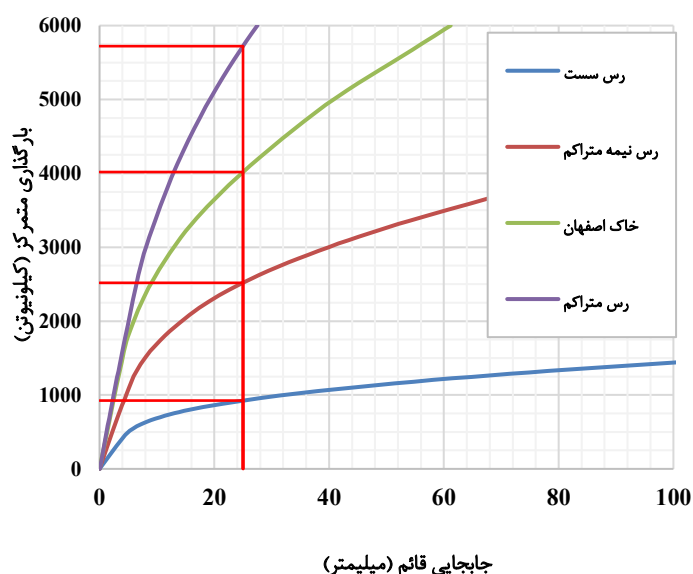
۴. بحث و بررسی

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه سازی عددی شمع پافیلی قائم تحت اثر بارگذاری فشاری در راستای قائم، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی شامل خاک، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بر ظرفیت باربری فشاری شمع پافیلی است. بدین منظور، کلیه حالات مدل سازی شده با مدل پایه (خاک آبرفتی اصفهان) مقایسه شده است و خصوصیات سازه ای مدل پایه شمع

که در شکل ۵ ترسیم شده است، ملاک محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع پافیلی، نشست ۲۵ میلی‌متر است، که با ترسیم خط به رنگ قرمز نشان داده شده است.

ظرفیت باربری محاسبه شده در انواع متفاوت خاک از رس سست، رس نیمه متراکم، خاک اصفهان و رس متراکم به ترتیب برابر با مقادیر ۹۲۵، ۲۵۱۸، ۴۰۱۸ و ۵۷۲۲ کیلونیوتن هست، که نشان از حساسیت قابل توجه ظرفیت باربری شمع پافیلی نسبت به تغییرات ژئوتکنیکی خاک اطراف است به عبارت دیگر، افزایش تراکم خاک از حالت سست به متراکم، ظرفیت باربری را حدود ۵۲۰ درصد (۶ برابر) افزایش می‌دهد.

با تغییرات به عمل آمده در نوع خاک و محاسبه‌ی ظرفیت باربری قائم شمع پافیلی تحت بارگذاری قائم فشاری، نموداری مطابق شکل ۶ قابل ترسیم است. همانطور که مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری در حالات متفاوت ژئوتکنیکی با شرایط تراکمی خاک، تقریباً رابطه‌ی خطی داشته که از معادله‌ی (۱) جدول ۴ پیروی می‌کند.



شکل ۵. منحنی بار-نشست شمع پافیلی در خاک‌های متفاوت

عامل متغیر در هر دوره مدل‌سازی، به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۴. بررسی اثر جنس خاک بر شمع‌های پافیلی

برای تمرکز بر روی تأثیر تغییرات نوع خاک بر ظرفیت باربری شمع پافیلی، از ۴ حالت متفاوت خاک بهره گرفته شده است. همان‌طور که در جدول ۳ آورده شده است، برای این مهم از خاک‌های رسی سست، رسی نیمه متراکم، رسی متراکم و خاک منطقه‌ی اصفهان استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حالت‌های متفاوت ارائه شده، بازه گسترده‌ای از انواع خاک‌های رسی را شامل می‌شود. یکی از مهم‌ترین گام‌ها در مدل‌سازی عددی، انتخاب خاک مرجعی با پارامترهای ژئوتکنیکی معتبر است. در پژوهش حاضر، خاک آبرفتی منطقه اصفهان به‌عنوان حالت پایه (Base Case) انتخاب گردید. دلیل اصلی، وجود پیشینه تحقیقاتی [۲۳ و ۲۴] گسترده در زمینه شناسایی پارامترهای ژئوتکنیکی نهشته‌های کواترنری اصفهان [۲۳ و ۲۴] می‌باشد.

بر اساس مطالعات مذکور، نهشته‌های اصفهان به پنج منطقه تقسیم می‌شوند که پارامترهای هر یک با آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی تعیین گردیده است. خاک مورد استفاده در این پژوهش ($C=50 \text{ kN/m}^2$, $\phi=35$ درجه، $\gamma_t=16.5 \text{ kN/m}^3$ و $E_m=5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$) مطابقت نزدیکی با مشخصات مورد نظر دارد که پایدارترین منطقه برای اجرای پروژه‌های عمرانی معرفی شده است. همچنین با توجه به شباهت زمین‌شناسی نهشته‌های اصفهان با بسیاری از شهرهای مرکزی و جنوبی ایران، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان نماینده مناسبی برای خاک‌های آبرفتی مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲. خصوصیات سازه‌ای نماینده گروه شمع در حالت پایه.

قطر شمع (متر)	طول شمع (متر)	تعداد حباب (متر)	قطر حباب (متر)
۰/۷	۱۰	۱	۱/۷۵

از نمودارهای پاسخ بار-نشست رسم شده برای حالت‌های متفاوت خاک در (شکل ۵) استنباط می‌شود که با افزایش تراکم در خاک رسی، توانایی باربری شمع پافیلی به شدت افزایش می‌یابد. همان‌طور

۲-۴. بررسی ضریب چسبندگی خاک

برای تمرکز بر روی تأثیر تغییرات ضریب چسبندگی خاک بر ظرفیت باربری شمع پافیلی، از ۴ حالت متفاوت بهره گرفته شده است. همانطور که در جدول ۵ آورده شده است، برای این مهم از خاک‌های با مقادیر چسبندگی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ کیلوپاسکال استفاده شده است. لازم به ذکر است در این حالت، به منظور تحلیل پارامتری و تفکیک اثر چسبندگی از سایر پارامترها، فرض شده است که سایر مشخصات ژئوتکنیکی خاک ثابت می‌مانند، این فرض با هدف کمی کردن سهم هر پارامتر به صورت جداگانه انجام گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود، حالت‌های متفاوت ارائه شده، محدوده گسترده‌ای از انواع خاک‌ها با ضرایب چسبندگی متفاوت را شامل می‌شود.



شکل ۶. مقادیر ظرفیت باربری شمع پافیلی در خاک‌های متفاوت

جدول ۳. انواع خاک‌های در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی

نوع خاک	C (kN/m ²)	Φ (درجه)	E _m (kN/m ²)	γ _t (kN/m ³)	ν	R _{inter}
خاک رسی سست	۱۷	۱۸	۱/۵×۱۰ ^۴	۱۳/۵	۰/۳۵	۰/۷
خاک رسی نیمه متراکم	۴۵	۲۵	۳/۵×۱۰ ^۴	۱۵	۰/۴	۰/۷
خاک آبرفتی اصفهان	۵۰	۳۵	۶/۵×۱۰ ^۴	۲۱	۰/۳	۰/۷
خاک رسی متراکم	۹۵	۳۲	۷/۵×۱۰ ^۴	۱۷	۰/۴۱	۰/۷

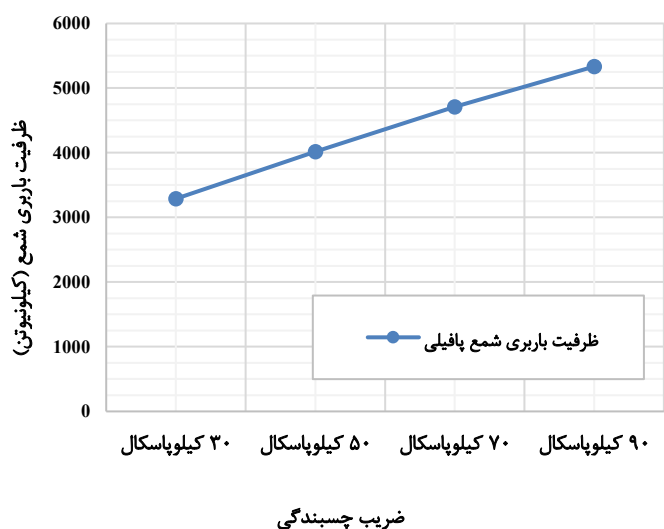
Φ، E_m، ν، و R_{inter} به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول شکل‌پذیری، وزن مخصوص، نسبت پواسون و ضریب اندرکنش در فصل مشترک توده خاک می‌باشند.

جدول ۴. معادلات تجربی

ردیف	پارامتر	واحد	محدوده	معادله
۱	تراکم خاک	بدون بعد	۱ تا ۴	$(Q_u) = 1589 (\text{تراکم خاک}) + 677$
۲	C	(kN/m ²)	۳۰ تا ۹۰	$(Q_u) = 34 (C) + 2262$
۳	Φ	درجه	۱۵ تا ۳۵	$(Q_u) = 37/87 (\Phi) + 2323$

جدول ۵. حالت‌های مختلف خاک با ضریب چسبندگی متفاوت

نوع خاک	C (kN/m ²)	φ (درجه)	E _m (kN/m ²)	γ _t (kN/m ³)	ν	R _{inter}
حالت اول	۳۰	۳۵	۱/۵×۱۰ ^۴	۱۳/۵	۰/۳	۰/۷
حالت دوم	۵۰	۳۵	۳/۵×۱۰ ^۴	۱۵	۰/۳	۰/۷
حالت سوم	۷۰	۳۵	۶/۵×۱۰ ^۴	۲۱	۰/۳	۰/۷
حالت چهارم	۹۰	۳۵	۷/۵×۱۰ ^۴	۱۷	۰/۳	۰/۷



شکل ۸. مقادیر ظرفیت باربری شمع پافیلی در خاک‌های با مقادیر چسبندگی متفاوت

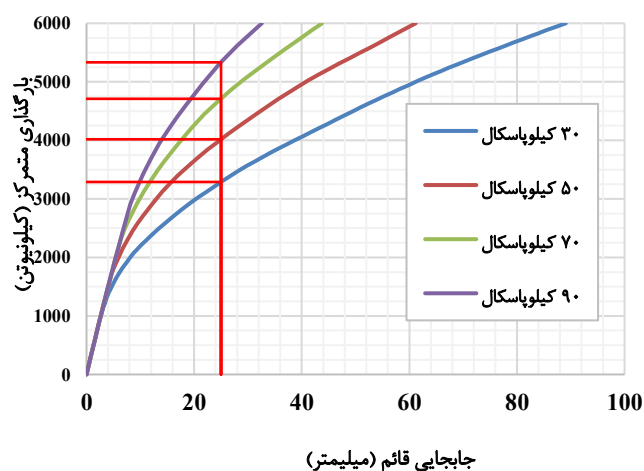
۴-۳. بررسی زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک

برای تمرکز بر روی تأثیر تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بر ظرفیت باربری شمع پافیلی، از ۴ حالت متفاوت بهره گرفته شده است. همانطور که در (جدول ۶) آورده شده است، برای این مهم از خاک‌های با زوایای اصطکاک داخلی ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه استفاده شده است. لازم به ذکر است در این حالت، تمامی مشخصات ژئوتکنیکی خاک به جز زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، ثابت در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حالت‌های متفاوت ارائه شده، طیف گسترده‌ای از انواع خاک‌ها با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت را شامل می‌شود.

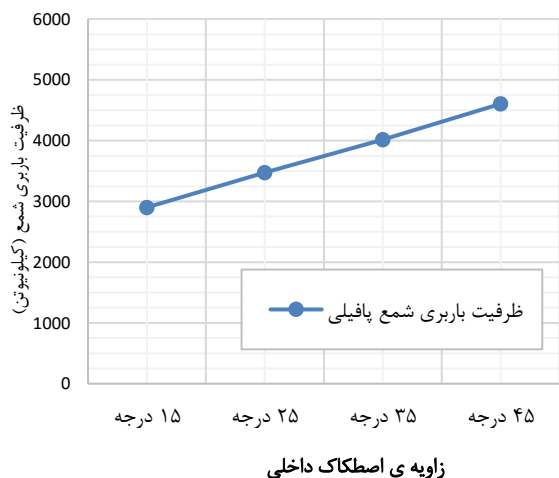
از نمودارهای بار-نشست رسم شده برای حالت‌های متفاوت خاک با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت در شکل ۹ مشاهده می‌شود، که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی در خاک‌های مورد بررسی، توانایی داخلی از ۱۵ به ۴۵ درجه، ظرفیت باربری نهایی شمع پافیلی از ۲۹۰۲ به ۴۶۰۵ کیلو نیوتن افزایش می‌یابد که معادل ۵۹ درصد می‌باشد. بررسی نرخ افزایش ظرفیت باربری در گام‌های متوالی نشان می‌دهد که این نرخ روند کاهشی دارد؛ به طوری که در گام اول (افزایش از ۱۵ به ۲۵ درجه) مقدار افزایش برابر ۵۷۲

از نمودارهای بار-نشست رسم شده برای حالت‌های متفاوت خاک با ضرایب چسبندگی متفاوت در شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش چسبندگی در خاک‌های مورد بررسی، توانایی باربری شمع پافیلی افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که با افزایش چسبندگی از ۳۰ به ۹۰ کیلو پاسکال، ظرفیت باربری نهایی از ۳۲۸۹ به ۵۳۳۴ کیلو نیوتن افزایش می‌یابد که معادل ۶۲ درصد می‌باشد. همچنین نرخ افزایش ظرفیت باربری با افزایش چسبندگی، روند کاهشی دارد؛ به طوری که افزایش چسبندگی در گام اول (۳۰ به ۵۰) معادل ۷۲۹ کیلو نیوتن و در گام آخر (۷۰ به ۹۰) به ۶۲۴ کیلو نیوتن کاهش یافته است. ظرفیت باربری محاسبه شده در انواع متفاوت خاک از خاکی با ضریب چسبندگی ۳۰ کیلو پاسکال تا خاکی با ضریب چسبندگی ۹۰ کیلو پاسکال، به ترتیب برابر با مقادیر ۳۲۸۹، ۴۰۱۸، ۴۷۱۰ و ۵۳۳۴ کیلو نیوتن بدست آمده است، که نشان از حساسیت ظرفیت باربری شمع پافیلی نسبت به تغییرات چسبندگی در خاک است.

با تغییرات به عمل آمده در چسبندگی محیط بلوک خاک و محاسبه‌ی ظرفیت باربری قائم شمع پافیلی تحت بارگذاری قائم فشاری، نموداری مطابق شکل ۸ قابل ترسیم است. همانطور که مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری در حالات متفاوت ژئوتکنیکی با مقادیر چسبندگی متفاوت، با یکدیگر رابطه‌ی خطی داشته که از معادله‌ی (۲) در جدول قبلی ۴ پیروی می‌کند.



شکل ۹. منحنی بار-نشست شمع پافیلی در خاک‌های با مقادیر چسبندگی متفاوت



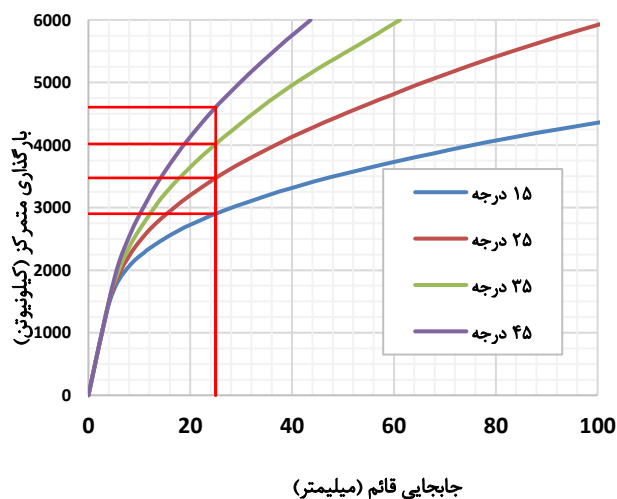
شکل ۱۰. مقادیر ظرفیت باربری شمع پافیلی در خاک‌های با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت

۴-۴. محاسبه‌ی عرض و عمق بهینه برای مدل

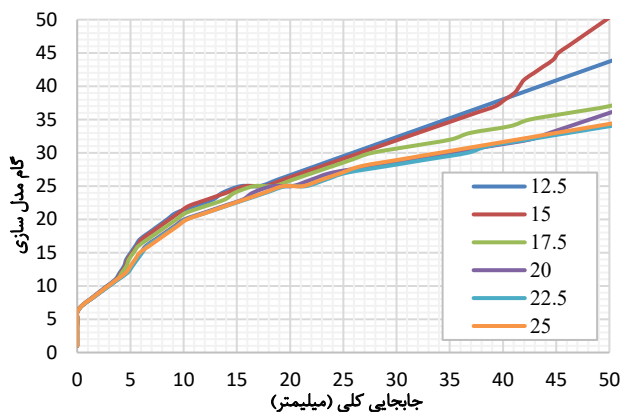
هنگام مدل‌سازی عددی، یافتن عرض و عمق مناسب برای مدل سه بعدی باید مورد توجه ویژه‌ای قرار بگیرد، که بتوان با در نظر گرفتن عرض و عمق به دست آمده از تحلیل حساسیت ابعاد مدل، از محدود بودن ابعاد مدل در فضای نرم‌افزار در دو راستای افقی و عمودی، چشم پوشی کرد؛ این روند، تحلیل حساسیت به منظور یافتن ابعاد مدل، است، لذا عرض و عمق بهینه، برابر با ابعادی است که در آن خطای حاصل از محدود در نظر گرفتن عرض و عمق، قابل صرف نظر کردن باشد. از ویژگی‌های مهم تحلیل حساسیت می‌توان به کم کردن زمان حل مسئله اشاره کرد، چون با وسیع گرفتن سطح مدل، تعداد المان‌ها زیاد شده و زمان حل مسئله نیز به دنبال آن، افزایش می‌یابد. از این رو با مشاهده‌ی خروجی‌های جابجایی مدل‌سازی و ترسیم آن در نمودارهای مربوطه در ابعاد متفاوت مدل‌سازی، می‌توان به مورد قبول بودن ابعاد مدل پی برد. از این رو با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، مشاهده می‌شود که ابعادی برابر با ۱۵×۱۵ متر مربع برای پلان مدل‌سازی عددی و با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ عمقی برابر با ۲۰ متر، به‌عنوان بهترین ابعاد مدل‌سازی می‌باشند. به منظور تعیین ابعاد بهینه مدل عددی، آنالیز حساسیت برای ابعاد پلان ۱۰، ۱۲.۵، ۱۵، ۱۷.۵، ۲۰، ۲۲.۵ و ۲۵ متر و عمق‌های ۱۲.۵، ۱۵، ۱۷.۵، ۲۰، ۲۲.۵ و ۲۵ متر انجام شد.

کیلونیوتن، در گام دوم (۲۵ به ۳۵ درجه) برابر ۵۴۴ کیلونیوتن و در گام سوم (۳۵ به ۴۵ درجه) به ۴۸۷ کیلونیوتن کاهش می‌یابد. این رفتار حاکی از آن است که بهره‌وری افزایش زاویه اصطکاک داخلی در مقادیر بالاتر کاهش یافته و سهم آن در افزایش ظرفیت باربری کمتر می‌شود. ظرفیت باربری محاسبه شده در انواع متفاوت خاک از خاکی با زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۱۵ درجه تا خاکی با زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۴۵ درجه، به ترتیب برابر با مقادیر ۲۹۰۲، ۳۴۷۴، ۴۰۱۸ و ۴۶۰۵ کیلونیوتن هست که نشان از حساسیت ظرفیت باربری شمع پافیلی نسبت به تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی در محیط ژئوتکنیکی هست.

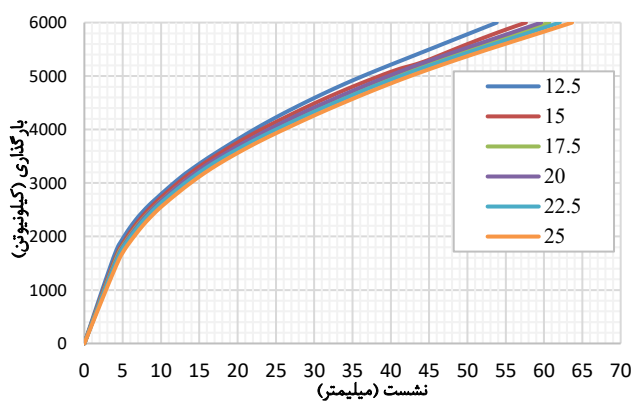
با تغییرات به عمل آمده در زاویه‌ی اصطکاک داخلی محیط لایه خاکی و محاسبه‌ی ظرفیت باربری قائم شمع پافیلی تحت بارگذاری قائم فشاری، نموداری مطابق شکل ۱۰ قابل ترسیم است. همانطور که مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری در حالات متفاوت تعریف شرایط بلوک خاک با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت، با یکدیگر رابطه‌ی خطی داشته که از معادله‌ی (۳) در جدول قبلی ۴ پیروی می‌کند.



شکل ۹. منحنی بار-نشست شمع پافیلی در خاک‌های با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت



شکل ۱۳. جابجایی کلی شمع پافیلی در برابر گام مدل‌سازی در اعماق متفاوت مدل‌سازی

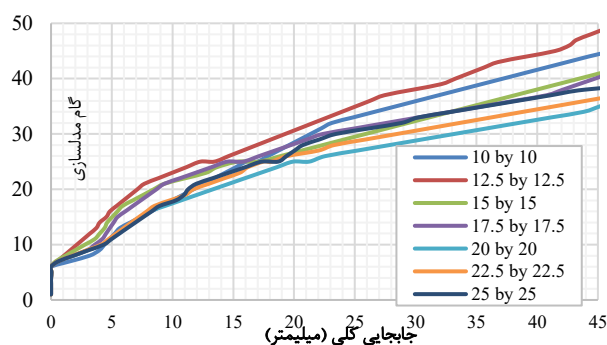


شکل ۱۴. جابجایی قائم شمع پافیلی در برابر بارگذاری در اعماق متفاوت مدل‌سازی

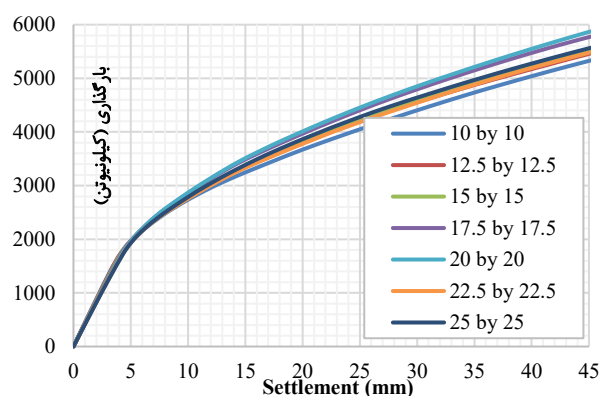
۵-۴. مقایسه‌ی تاثیر پارامترهای مختلف

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده در بخش‌های گذشته که مربوط به تغییرات اعمال‌شده به مشخصات هندسی، سختی و مقاومتی محیط بلوک خاک است، و روابط استخراج شده و همچنین شکل ۱۵ برمی‌آید، از بین پارامترهای مورد بررسی به ترتیب تراکم خاک، ضریب چسبندگی خاک، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک به ترتیب با درصد‌های ۵۲۰، ۶۲ و ۵۹ بیشترین تا کمترین نقش را در تغییرات ظرفیت باربری ایفا کرده‌اند (روابط تکرار شده در ذیل (جدول ۷) به ترتیب تأثیر آورده شده است).

ملاک انتخاب ابعاد بهینه، تغییر کمتر از ۳ درصد در حداکثر جابجایی قائم شمع با افزایش ابعاد مدل در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که افزایش ابعاد پلان از ۱۵ به ۲۵ متر و افزایش عمق از ۲۰ به ۲۵ متر، تغییر ناچیزی (کمتر از ۳ درصد) در نتایج جابجایی ایجاد می‌کند، در حالی که کاهش ابعاد از مقادیر مذکور منجر به خطای قابل توجهی می‌گردد. بنابراین، ابعاد پلان ۱۵ متر و عمق ۲۰ متر به‌عنوان ابعاد بهینه مدل عددی انتخاب گردیدند. بر این اساس، ابعاد پلان ۱۵ متر و عمق ۲۰ متر به‌عنوان ابعاد بهینه مدل انتخاب شدند، چراکه: ۱. افزایش بیشتر ابعاد، تغییر ناچیزی در نتایج ایجاد می‌کند. ۲. کاهش ابعاد از مقادیر مذکور، خطای قابل توجهی به همراه دارد. ۳. این ابعاد ضمن تأمین دقت مناسب، از افزایش غیرضروری حجم محاسبات و زمان حل جلوگیری می‌نماید.



شکل ۱۱. جابجایی کلی شمع پافیلی در برابر گام مدل‌سازی در ابعاد متفاوت پلان



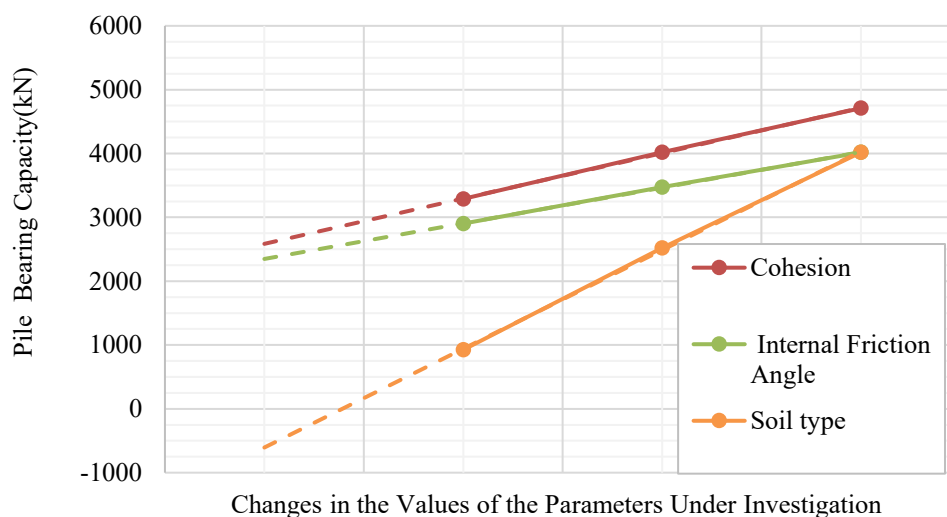
شکل ۱۲. جابجایی قائم شمع پافیلی در برابر بارگذاری در ابعاد متفاوت پلان

جدول ۶. حالت‌های مختلف خاک با زاویه اصطکاک داخلی متفاوت

R_{inter}	ν	γ_t (kN/m ³)	E_m (kN/m ²)	ϕ (درجه)	C (kN/m ²)	نوع خاک
۰/۷	۰/۳	۱۳/۵	$1/5 \times 10^4$	۱۵	۵۰	حالت اول
۰/۷	۰/۳	۱۵	$3/5 \times 10^4$	۲۵	۵۰	حالت دوم
۰/۷	۰/۳	۲۱	$6/5 \times 10^4$	۳۵	۵۰	حالت سوم
۰/۷	۰/۳	۱۷	$7/5 \times 10^4$	۴۵	۵۰	حالت چهارم

جدول ۷. معادلات تجربی

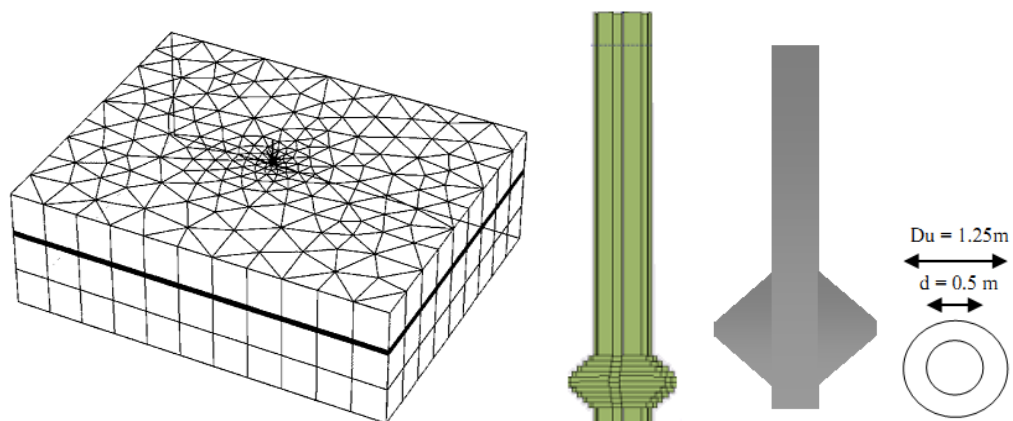
معادله	محدوده	واحد	پارامتر	ردیف
$(Q_u) = 1589(\text{تراکم خاک}) + 677$	۱ تا ۴	بدون بعد	تراکم خاک	۱
$(Q_u) = 34(C) + 2262$	۳۰ تا ۹۰	(kN/m ²)	C	۲
$(Q_u) = 37/87(\phi) + 2323$	۱۵ تا ۳۵	درجه	ϕ	۳



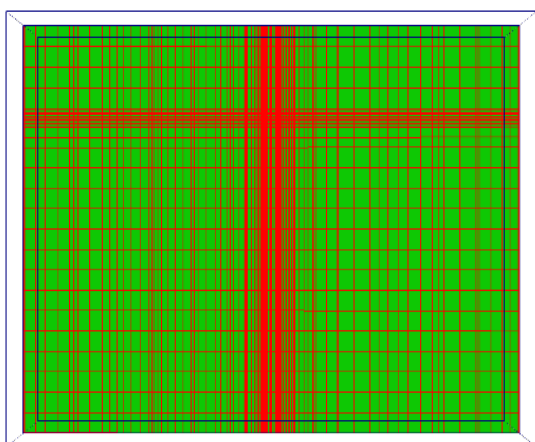
شکل ۱۵. مقادیر ظرفیت باربری شمع پافیلی در بررسی پارامترهای مختلف به صورت همزمان

جدول ۸. اطلاعات پروفیل خاک در مطالعات مردانی و همکاران [۲۵]

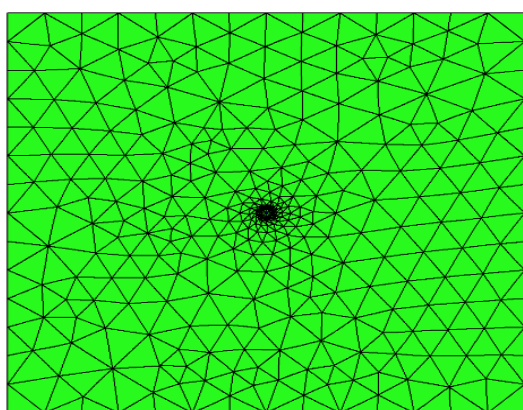
E_m (KN/m ²)	Y (-)	ϕ (-)	C (KN/m ²)	γ_d (KN/m ³)	محیط
۶۰۰۰۰	۰/۳	۲۲/۵	۲۰	۲۰	خاک رسی
3×10^7	۰/۲	-	-	۲۴	بتن شمع



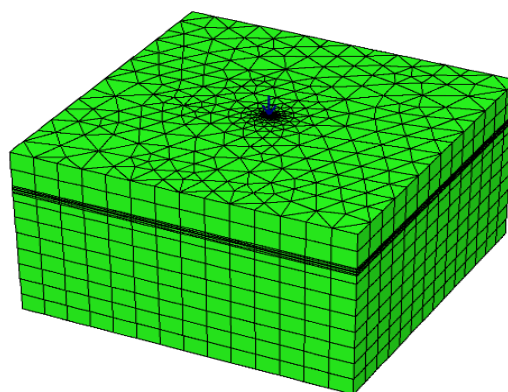
شکل ۱۶. فضای مدل‌سازی عددی در مطالعات [۲۵]



(ب) مقطع محیط مدل‌سازی



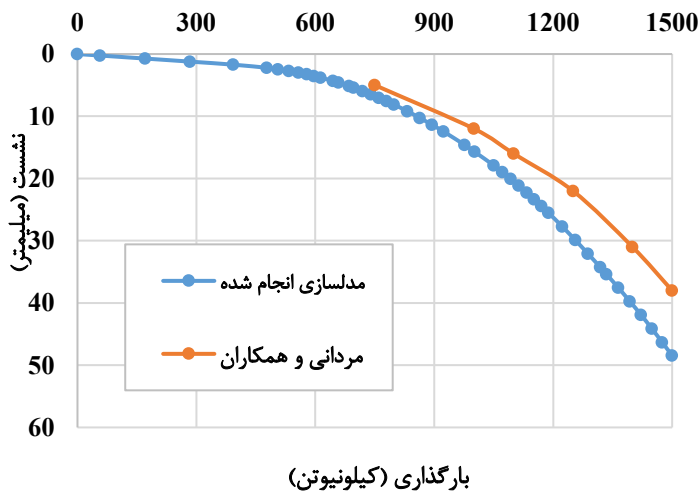
(ج) پلان محیط مدل‌سازی



(د) مش‌بندی در حالت سه‌بعدی

۴-۶. صحت‌سنجی نتایج نرم‌افزار مورد استفاده

به منظور بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار و مدل‌های مورد پژوهش، از تحقیقات انجام شده توسط مردانی و همکاران [۲۵] استفاده شده است. مشخصات محیط مسئله و مدل‌سازی مورد بررسی توسط ایشان در (جدول ۸) و اشکال (۱۶) و (۱۷) آمده است.



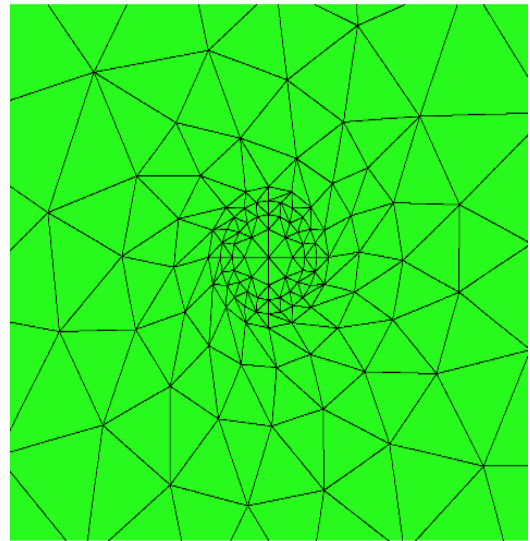
شکل ۱۹. نمودار بار-نشست برای صحت سنجی نرم افزار

۵. نتیجه گیری

پژوهش حاضر مبتنی بر تحلیل‌های عددی بوده و به منظور تحلیل و بررسی رفتار ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های پافیلی در خاک‌های چسبنده انجام گرفته است. در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود Plaxis 3D جهت مدل‌سازی مسئله استفاده شد. در این پژوهش مجموعاً بیش از ۸۰ مدل سه‌بعدی با استفاده از نرم افزار تحلیل گردید که شامل حالت‌های مختلف خاک، سطوح مختلف چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، آنالیز حساسیت ابعاد مدل و صحت‌سنجی با نتایج پژوهش‌های پیشین می‌باشد.

پژوهش حاضر مبتنی بر تحلیل عددی به بررسی تأثیر سه پارامتر اصلی ژئوتکنیکی شامل تراکم خاک، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بر ظرفیت باربری فشاری شمع پافیلی در خاک‌های رسی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود انجام گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان داد که شمع‌های پافیلی حساسیت بسیار بالایی به تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی محیط خاک دارند و تغییر در هر یک از این پارامترها می‌تواند تغییرات قابل توجهی در ظرفیت باربری نهایی ایجاد کند. در ادامه، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به تفکیک ارائه می‌گردد

۱- افزایش تراکم خاک از حالت سست به متراکم، ظرفیت باربری نهایی را از ۹۲۵ به ۵۷۲۲ کیلو نیوتن (بیش از ۶ برابر یا حدود ۵۱۹



(د) بزرگنمایی پلان

شکل ۱۷. مش‌بندی فضای مدل‌سازی برای صحت سنجی نرم افزار Plaxis 3D.

به منظور ارزیابی دقت و صحت روش عددی به کاررفته در این مطالعه، مدل‌سازی سه‌بعدی یک شمع پافیلی با طول ۶ متر و قطر ۰/۵ متر در خاک رسی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Plaxis 3D انجام شد. مشخصات ژئوتکنیکی خاک و بتن و شرایط بارگذاری به طور کامل منطبق با مطالعه عددی مرجع مردانی و همکاران [۲۵] در نظر گرفته شد. منحنی بار-نشست حاصل از مدل‌سازی حاضر با نتایج گزارش شده در پژوهش عددی مذکور مقایسه گردید. مطابقت بسیار خوب این دو منحنی در محدوده بارگذاری تا نشست ۵۰ میلی‌متر، نشان دهنده عملکرد صحیح نرم افزار انتخابی و مدل عددی آن از نظر مش‌بندی، تعریف شرایط مرزی، انتخاب مدل رفتاری مور-کولمب و اعمال سطوح تماس در محل فصل مشترک شمع-خاک (Interface) است. بر این اساس، روش مدل‌سازی ارائه شده از قابلیت اطمینان لازم جهت انجام تحلیل‌های پارامتری و بررسی تأثیر تغییر پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی بر ظرفیت باربری شمع‌های پافیلی برخوردار است.

۹- با افزایش تراکم خاک، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، ظرفیت باربری شمع پافیلی افزایش می‌یابد، اما نرخ این افزایش در مقادیر بالاتر پارامترها کاهش می‌یابد که حاکی از رفتار غیرخطی و کاهش بهره‌وری پارامترهای ژئوتکنیکی در سطوح بالاتر می‌باشد.

۱۰- مجموعاً بیش از ۸۰ مدل سه‌بعدی در این پژوهش تحلیل گردید. گستردگی تحلیل‌های انجام‌شده، اعتبار روابط تجربی استخراج‌شده را افزایش می‌دهد.

پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی: بررسی قطر، طول شمع، اثر تعداد و فاصله حباب‌ها، اثر بارگذاری کششی و اثر گروه شمع در خاک‌های رسی و تاثیر آب را با استفاده از روش عددی توصیه می‌گردد.

منابع

- [1] Golait Ys, Satyanarayana V, Raju Ss. Concept Of Under Reamed Cemented Stone Columns For Soft Clay Ground Improvement. Inproc., Indian Geotechnical Conf 2009: Vol. 1, Pp. 356-360.
- [2] Jennings, J. E., & Henkel, D. J. The Use Of Under-Reamed Pile Foundations On Expansive Clay Soils In South Africa. National Building Research Institute, 1949.
- [3] Martin R, Destephen R. Large Diameter Double Underreamed Drilled Shafts. Journal Of Geotechnical Engineering, Asce; 1983: Vol 109, No. 8.
- [4] Sharma, D., For Which Soil Conditions Are Under-Reamed Pile Foundations Superior To Other Foundations System. Expert Paper, Proc, Igc, 1986, Vol I, Pp. 126-128
- [5] Peter, J. Annie, N. Lakshmanan, and P. Devadas Manoharan. "Investigations on the static behavior of self-compacting concrete under-reamed piles." Journal of materials in civil engineering 18.3 2006: 408-414.
- [6] Kurian NP, Srilakshmi G. Studies on the geometrical features of under-reamed piles by the finite element method. Journal of Karunya University. 2010;2(1):1-4.
- [7] Tand KE, Vipulanandan C. Modeling of Load-Displacement Behavior of Underreamed Footings in Jointed Clays Using FEM. In Advances in Designing and Testing Deep Foundations: In Memory of Michael W. O'Neill 2005 (pp. 324-344).

درصد افزایش) رساند. این پارامتر بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری داشته است.

۲- افزایش چسبندگی از ۳۰ به ۹۰ کیلوپاسکال، ظرفیت باربری را از ۳۲۸۹ به ۵۳۳۴ کیلونیوتن افزایش داد که معادل ۶۲ درصد می‌باشد. نرخ افزایش ظرفیت باربری با افزایش چسبندگی، روند کاهشی دارد.

۳- افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۱۵ به ۴۵ درجه، ظرفیت باربری را از ۲۹۰۲ به ۴۶۰۵ کیلونیوتن رساند که معادل ۵۹ درصد افزایش می‌باشد. بهره‌وری افزایش زاویه اصطکاک در مقادیر بالاتر کاهش می‌یابد.

۴- از میان پارامترهای مورد بررسی، تراکم خاک بیشترین تأثیر و زاویه اصطکاک داخلی کمترین تأثیر را بر ظرفیت باربری شمع پافیلی در خاک‌های رسی داشته‌اند.

۵- روابط تجربی استخراج‌شده در این پژوهش مبتنی بر فرض‌های ساده‌کننده‌ای از جمله همگن و همسان‌گرد فرض شدن محیط خاک، تفکیک اثر پارامترها در تحلیل تک‌پارامتری و صرف‌نظر از اندرکنش همزمان آن‌ها می‌باشند. اگرچه این فرض‌ها برای کمی کردن سهم مستقل هر پارامتر ضروری بوده‌اند، اما کاربرد نتایج در پروژه‌های واقعی نیازمند تفسیر محتاطانه و در نظر گرفتن شرایط خاص هر سایت می‌باشد. لذا استفاده از روابط ارائه‌شده به‌عنوان تخمین اولیه توصیه می‌گردد و برای طراحی نهایی، انجام تحلیل‌های تکمیلی با در نظر گرفتن شرایط واقعی خاک و اندرکنش پارامترها ضروری است.

۶- شمع‌های پافیلی گزینه‌ای بسیار کارآمد برای پی‌سازی در خاک‌های رسی با تراکم متوسط تا زیاد هستند، اما در خاک‌های رسی سست، ظرفیت باربری آنها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و ممکن است نیاز به تمهیدات تکمیلی باشد.

۷- بر اساس تحلیل حساسیت انجام‌شده، ابعاد بهینه مدل عددی برای پلان و عمق به ترتیب ۱۵×۱۵ متر و ۲۰ متر تعیین گردید.

۸- صحت‌سنجی مدل عددی با مقایسه منحنی بار-نشست حاصل از تحلیل حاضر با نتایج مطالعه مرجع [۲۵]، مطابقت بسیار خوبی را در محدوده بارگذاری تا نشست ۵۰ میلی‌متر نشان داد. این همخوانی، عملکرد صحیح نرم‌افزار و قابلیت اطمینان روش مدل‌سازی را تأیید می‌کند.

- [18] Zhang, X., Yao, W., Huang, K., Liu, Q., & Shi, B. Lateral Response Of Wind Turbine Belled Piles In Loess: Revisiting Belled Base Contribution. *Ocean Engineering*, 2026: 319, 120673.
- [19] Nariyelil Aj, Cyrus S, Abraham Bm, Balakrishnan Sd. Multi-Tiny Bulb Under-Reamed Piles As An Alternative For Conventional Under-Reamed Piles In Saturated Marine Clay. *Indian Geotechnical Journal*. 2025 Dec 27:1-7.
- [20] Nariyelil Aj, Cyrus S, Abraham Bm, Balakrishnan Sd. Experimental Analysis Of Uplift Behavior In Under-Reamed Piles: A Comparative Study In Saturated Clay And Clayey Sand. *Indian Geotechnical Journal*. 2026 Mar;56(3):1462-77.
- [21] Shrivastava N, Bhatia N. Ultimate Bearing Capacity Of Under-Reamed Pile-Finite Element Approach. In the 12th International Conference Of International Association For Computer Methods And Advances In Geomechanics (Iacmag) 2008 Oct 1 (Pp. 1-6).
- [22] Sharma D, Jain Mp, Prakash C. Handbook On Underreamed And Bored Compaction Pile Foundations. Jain; 1978.
- [23] Dadkhah, M., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., & Hafezi Moghaddas, Ngeological Engineering Model For Quaternary Deposits In Isfahan City, Iran. *Journal Of Geological Engineering*, . 2016. 42(4), 295-308
- [24] Ghafoori MR. Determination of Soil Strength Parameters of Quaternary Deposits Based on Physical Properties (South of Esfahan, Iran). *Comptes Rendus De L Academie Bulgare Des Sciences*. 2016 Jan 1.
- [۲۵] مردانی، ز.، علی الهی، ح.، مرتضوی، س.، (۱۳۹۲) بررسی عملکرد گروهی شمعهای پافیلی - پاپهن در مقابله با نیروهای کششی با استفاده از روش عددی، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.
- [۸] مکارچیان، مسعود و خادمی سنگانی، پیمان، ۱۳۸۸، بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر نیروی بالارانش (برکنش) شمع در خاک ماسه‌ای، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز.
- [۹] عسگری، میثم و خلقی فرد، مهرداد، ۱۳۹۵، بررسی عددی تغییرات طول و قطر شمع نسبت لاغری در ظرفیت باربری و نشست شمع‌های پافیلی، اولین همایش سراسری مباحث کلیدی در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی ایران، گرگان.
- [10] Gupta, S., Sundaram, R., For Which Soil Conditions Are Under-Reamed Pile Foundations Superior To Other Foundations System. *Expert Paper, Proc Igc, Vol Ii, Pp.131-133* 1986.
- [11] Shrivastava N, Bhatia N. Ultimate bearing capacity of under-reamed pile-finite element approach. In The 12th International Conference of International Association For Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 2008 Oct 1 (pp. 1-6).
- [12] Alielahi, H., Mardani, Z., & Daneshvar, S. (2014). Influence of under-reamed pile groups arrangement on tensile bearing capacity using FE method. *Electron J Geotech Eng*, 19, 1395-1.
- [۱۳] مردانی، ز.، علی الهی، ح.، مرتضوی، س.، (۱۳۹۳) ارزیابی عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت باربری فشاری شمع‌های پافیلی (پاپهن) واقع در خاک‌های دانه‌ای با استفاده از روش عددی، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، دانشگاه نوشیروانی بابل.
- [14] Li, Y., Lei, G., Lu, J., Yao, A., Li, H., & Gong, Y. Failure Mechanism And Ultimate Uplift Capacity Calculation Method For Belled Uplift Piles Considering Influences From Underground Water. *International Journal Of Geomechanics*, 2025 25(1), 1-17.
- [15] Zhou, J., Song, Y., Gong, B., Liang, S., & Wang, H. Analysis Of Bearing Mechanism Of Large-Diameter Under-Reamed Piles Based On Model Tests. *Plos One*, 2025,20(12), E0338899.
- [16] Dadhich, S., Sharma, J. K., & Madhav, M. Estimation Of The Uplift Resistance For An Under-Reamed Pile In Dry Sand Using Machine Learning. *Slovak Journal Of Civil Engineering*, 2022,30(3), 17-26.
- [17] Sakr, M., Nasr, A., Khaffaf, M., & Basha, A. Behavior Of Under-Reamed Piles Under Inclined Uplift Loads In Sand. *International Journal Of Geo-Engineering*, 2025,16(1), 1-22.