

EXTENDED ABSTRACT

Bearing Capacity of a Post Grout Drilled Pile Group Adjacent to a Sandy Slope

Reza Mohammad Ali Nejad^{a,*}, Meysam Bayat^b

^a Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ahwaz Branch, Islamic Azad University, Ahwaz, Iran

^b Associate Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Received: 03 February 2025; **Reviewed:** 25 August 2026; **Accepted:** 25 August 2026

Keywords:

Pile group, Post grout, Slope, Finite element, Bearing capacity.

1. Introduction

In this research, using the finite element method and PLAXIS3D software, the bearing capacity of a post-grouted pile group installed at the crest of sandy slope is investigated. The effects of factors such as pile diameter, the ratio of embedded length to slope height, pile spacing, and the orientation of the linear pile group relative to the crest of slope on bearing capacity, efficiency coefficient, and tilting of cap are examined. In this study, pile groups with 3 different diameters, 3 different ratios of embedded length to slope height, and 3 different pile spacings were modeled at a distance equal to the pile diameter from the top of the sandy slope.

2. Methodology

In this research, the PLAXIS3D software was used for numerical modeling. The dimensions of the mesh elements were considered in such a way that they would not affect the results. The dimensions of the model were chosen so that the stresses caused by loading were not close to the boundaries and did not have an effect on the final stress, minimizing the potential effects of the boundaries.

There are various methods for determining the bearing capacity of large diameter piles. In this study, the O'Neill (1999) method was used to determine the bearing capacity of the pile group. According to the O'Neill (1999) method, the bearing capacity of the pile group is calculated at a settlement equivalent to 5% of the pile diameter.

Soil was modeled using a hardening soil model. In numerical modeling, the pile and grout bubble were modeled using a linear elastic model. Soil, pile, and grout parameters are presented in Table 1. The modeled slope for the pile group with a diameter of 1 and embedded length of 20 meters, the modeled pile, and grout bubble are shown in Fig. 1. Given that the piles in this study fall into the large-diameter pile category, volume elements were used to model the piles. In Table 1, the cohesion of sand is considered zero; however, to prevent numerical instability during model analysis, a small cohesion value (0.345 Kilopascals) was considered for sandy soil.

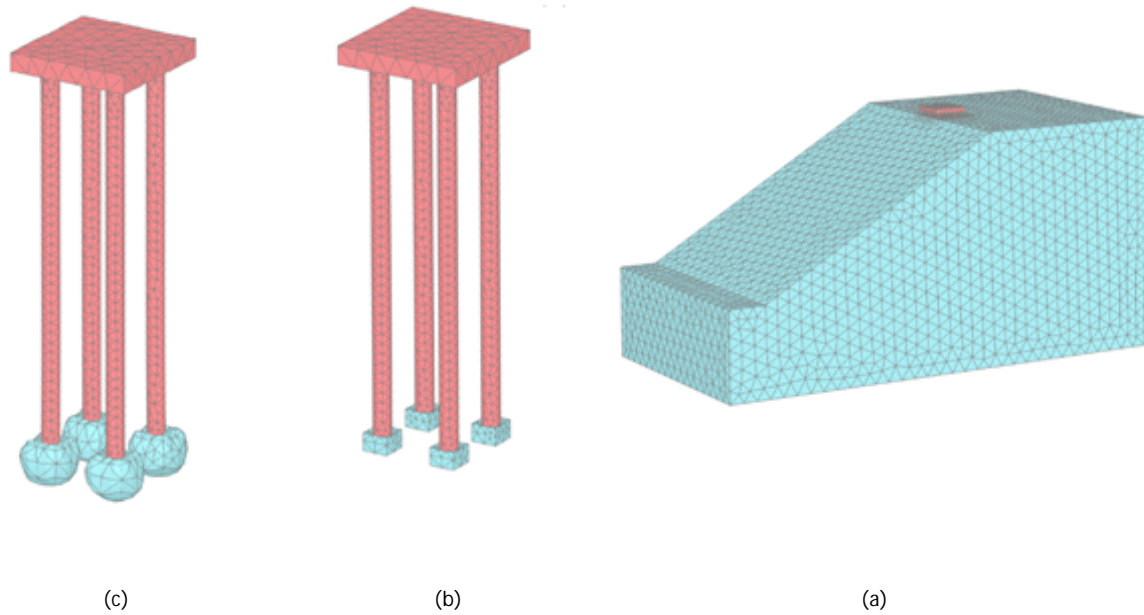


Fig. 1. **a)** 3D pitched roof model for a pile with a diameter of 1 and a embedded length of 20 meters, **b)** Pile group and part of the soil under the tip that will be affected by grout grout, **c)** Pile group and grout bubble formed around it

Table1. Property of soil, pile and grout

| Parameter | Unit | Sand | Pile | Grout |
|-----------------|-------------------|------|-------|-------|
| C | KN | 0 | - | - |
| γ | KN/m ³ | 16 | 25 | 20 |
| ϕ | Degree | 34 | - | - |
| ψ | Degree | 2.5 | - | - |
| μ | - | 0.3 | 0.2 | 0.2 |
| E_{s0}^{ref} | MPa | 20 | - | - |
| E_{ode}^{ref} | MPa | 25 | - | - |
| E_{ur}^{ref} | MPa | 120 | - | - |
| m | - | 0.5 | - | - |
| n | - | 0.6 | - | - |
| E | MPa | - | 30000 | 20000 |

3. Results and discussion

3.1. Comparison of bearing capacity of piles adjacent to a slope and located on horizontal ground

In this section, the post-grouted pile group at the tip and the pile nongrouted on a horizontal ground and adjacent to the sandy slope were modeled. Table 2 shows that with increasing distance between piles, the tilting in post-grouted and nongrouted pile groups decreases. Comparing the results of Table 2 shows that the pile tip post-grouted process reduces the titling of pile groups adjacent to the slope. With increasing pile spacing, the effect of the post-grouted process on tilting reduction becomes more pronounced. The reduction in tilting of post-grouted pile groups compared to non-grouted pile groups for pile spacings of 3d, 4d, and 5d is 47%, 53%, and 60%, respectively.

The results of Table 2 show that in pile group installed on a horizontal ground, the bearing capacity of the nongrouted pile group with pile spacing of 4d is higher than the bearing capacity of the pile group with pile spacing of 3d and 5d. However, in the nongrouted pile group adjacent to the slope, the bearing capacity of the pile group increases with increasing pile spacing. The results of Table 2 show that with increasing pile spacing in the post-grouted pile group, the bearing capacity of the pile group increases. The increase in bearing capacity of the post-grouted pile groups due to the increase caused by increasing spacing between piles in the pile group adjacent to the slope is more than the pile groups installed on a horizontal ground. Increasing the pile spacing from 3d to 5d, the bearing capacity of the post-grouted pile group installed on a horizontal ground and adjacent to the slope is 14% and 24%, respectively. The results in Table 2 show that as the pile spacing increases, the

BCR coefficient increases, and the BCR coefficient of the pile group adjacent to the slope is higher than the BCR coefficient of the pile group installed on a horizontal ground. With an increase in pile spacing from 3d to 5d, the BCR coefficient for post-grouted pile groups installed on horizontal ground and adjacent to the slope is in the range of 1.30-1.35 and 1.35-1.39, respectively.

Comparing the results in Table 2 shows that in piles installed on horizontal ground, the efficiency coefficient of the ungrouted pile group is higher than the efficiency coefficient of the post-grouted pile group at the tip. In piles adjacent to the slope, the efficiency coefficient of ungrouted and post-grouted pile groups increases with increasing pile spacing. The increase in efficiency coefficient due to increased pile spacing in the post-grouted pile group at the tip is greater than the increase in efficiency coefficient of the ungrouted pile group. With an increase in pile spacing from 3d to 5d, the bearing capacity and efficiency coefficient of ungrouted and post-grouted pile groups increased by 20% and 24%, respectively.

Table 2. Bearing capacity of pile group

| | | Center-to-center distance of the piles (based on pile diameter) | | | |
|------------|------------|---|--------|--------|--------|
| | | 3 | 4 | 5 | |
| Horizontal | Non-grout | Bearing capacity | 22392 | 25725 | 24682 |
| | | efficiency coefficient | 0.78 | 0.9 | 0.86 |
| | Post-grout | Bearing capacity | 29203 | 32603 | 33320 |
| | | efficiency coefficient | 0.73 | 0.81 | 0.83 |
| | | BCR | 1.3 | 1.33 | 1.35 |
| | | Tilting | 0.0026 | 0.0019 | 0.0015 |
| Near Slope | Non-grout | Bearing capacity | 18306 | 20639 | 22074 |
| | | efficiency coefficient | 0.66 | 0.75 | 0.8 |
| | Post-grout | RF | 0.81 | 0.84 | 0.89 |
| | | BCR | 1.35 | 1.37 | 1.39 |
| | | efficiency coefficient | 0.65 | 0.75 | 0.8 |
| | | Tilting | 0.0014 | 0.0009 | 0.0006 |

3.2. Effect of pile diameter

In this section, the effect of pile diameter on the bearing capacity of post-grouted pile groups was investigated. Piles with diameters of 1, 1.5, and 2 meters were modeled at a distance equal to the pile diameter from the crest of sandy slope. Table 3 results show that increasing pile diameter leads to an increase in bearing capacity and pile group efficiency coefficient. The increase in bearing capacity of pile groups due to diameter increase is greater in post-grout pile groups compared to nongrout pile groups. By increasing the pile diameter from 1 to 2 meters, the bearing capacity of nongrouted and post-grouted pile groups increases by 2.74 and 3.08 times, respectively. The increase in pile group efficiency coefficient due to diameter increase is more significant in nongrouted pile groups compared to post grouted pile groups. With an increase in pile diameter from 1 to 2 meters, the efficiency coefficient of non-injection and post-injection pile groups increases by 16% and 5%, respectively. Table 3 results showed that the BCR coefficient increases with increasing pile diameter. This is due to the increase in injection grout pressure with increasing pile diameter and the resulting pre-compression of soil under the pile tip. The BCR coefficient for pile groups with diameters of 1, 1.5, and 2 meters is 1.37, 1.41, and 1.55, respectively. With an increase in pile diameter from 1 to 2 meters, the BCR coefficient increased by 13%. Table 3 results showed that the pile tilting in post-grout group pile was less than the suggested values (0.002), but in nongrouted pile groups with diameters of 1.5 and 2 meters, the pile tilting exceeded the maximum suggested value.

Table 3. Bearing capacity of pile group

| | | Pile Diameter (m) | | |
|------------|------------------------|-------------------|--------|--------|
| | | 1 | 1.5 | 2 |
| Non-grout | Bearing capacity | 20635 | 38201 | 56460 |
| | efficiency coefficient | 0.75 | 0.77 | 0.87 |
| | Tilting | 0.0019 | 0.0023 | 0.003 |
| Post-Grout | Bearing capacity | 28369 | 53500 | 87354 |
| | BCR | 1.37 | 1.41 | 1.55 |
| | efficiency coefficient | 0.75 | 0.76 | 0.79 |
| | Tilting | 0.0014 | 0.0015 | 0.0018 |

3.3. Effect of the ratio of embedded length to slope height

In this section, the effect of the embedded length to the sandy slope height ratio (L/H) is investigated. Piles with L/H ratios of 0.33, 0.67, and 1 (with embedded lengths of 10, 20, and 30 meters, respectively) were modeled in 2 conditions: nongrouted and post-grout at the tip near the sandy slope. The slope height was 30 meters, and the slope angle was considered 30 degrees.

The results of Table 4 showed that with increasing the embedded length, the pile group bearing capacity increased, and this increase in bearing capacity was higher in the nongrouted pile group compared to the post grouted pile group. This indicates a decrease in the effect of the post-grout process on increasing bearing capacity with increasing pile embedded length. With an increase in embedded length from 10 to 30 meters, the bearing capacity of the non-grout and post-grout pile groups increased 2.74 and 2.59 times, respectively. The results of Table 4 show that with increasing pile embedded length, the BCR coefficient decreases. These results are consistent with the results of salem at el (2024) regarding individual post-grout piles. With an increase in embedded length from 10 to 30 meters, the BCR coefficient decreases by 31%. The results of Table 4 show that the efficiency coefficient of pile groups decreases with increasing embedded length. With an increase in pile embedded length from 10 to 30 meters, the efficiency coefficient of non-grout and post-grout pile groups decreases by 20% and 22%, respectively. With increasing pile embedded length, the pile group rotation decreased. The effect of the post-grout process on reducing tilting decreased with increasing pile head embedded length. The reduction in tilting due to the post-grout process for pile groups with embedded lengths of 10, 20, and 30 meters was 37%, 26%, and 20%, respectively.

Table 4. Bearing capacity of pile group

| | | Embedded length (m) | | |
|------------|------------------------|---------------------|--------|--------|
| | | 10 | 20 | 30 |
| Non-grout | Bearing capacity | 9539 | 20639 | 35672 |
| | efficiency coefficient | 0.91 | 0.75 | 0.73 |
| | Tilting | 0.0027 | 0.0019 | 0.001 |
| Post Grout | Bearing capacity | 15302 | 28369 | 39674 |
| | BCR | 1.6 | 1.37 | 1.11 |
| | efficiency coefficient | 0.83 | 0.75 | 0.65 |
| | Tilting | 0.0017 | 0.0014 | 0.0008 |

3.3. Effect of the orientation of the linear pile group relative to the slope crest

In this section, the effect of the orientation of the 2×1(P), 2×1(v), 3×1(p), and 3×1(v) linear pile group relative to the crest of slope on the bearing capacity of the post-grouted pile group was investigated. Table 5 results show that the tilting of the post-grouted pile group is less than the head tilting of the non-grouted pile group. The reduction in tilting is more significant in piles parallel to the crest of slope due to the post-grouting process. The reduction in tilting due to the post-grouting process in 2×1(p) and 3×1(p) pile groups is 46% and 32%, respectively, and the reduction in tilting due to the post-grouting process in 2×1(v) and 3×1(v) pile groups is 25% and 23%, respectively, as shown in Table 6. The results of Table 6 indicate that the bearing capacity of the linear pile group perpendicular to the crest of slope is higher than the bearing capacity of the pile group parallel to the slope. Comparing the results in Table5 shows that the effect of the linear pile group orientation relative to the crest of slope on bearing capacity is less in the post-grouted pile group compared to the non-grouted pile group. The bearing capacity of the 2×1(v) pile group in non-grouted and post-grouted groups is 11% and 6% higher, respectively, than the bearing capacity of the 2×1(p) pile group. Similarly, the bearing capacity of the 3×1(v) pile group in non-grouted and post-grouted groups is 15% and 8% higher, respectively, than the bearing capacity of the 3×1(p) pile group.

The BCR coefficient of the pile groups parallel to the slope is higher than the BCR coefficient of the pile groups perpendicular to the slope. The BCR coefficients of 2×1(p) and 2×1(v) groups are 1.50 and 1.43, respectively, and the BCR coefficients of 3×1(p) and 3×1(v) groups are 1.45 and 1.37, respectively. With an increase in the number of piles in the linear pile group, the BCR coefficient slightly decreases. The BCR coefficient of the 2×1(p) pile group is 3% higher than the BCR coefficient of the 3×1(p) pile group, and the BCR coefficient of the 2×1(v) pile group is 4% higher than the BCR coefficient of the 3×1(v) pile group.

The efficiency coefficient of the non-grouted pile group parallel to the slope is higher than that of the pile group perpendicular to the roof slope, and the efficiency coefficient decreases with an increase in the number of piles in the linear group. The efficiency coefficient of the pile groups without injection 2×1(p) and 2×1(v) are 0.89 and 0.89, respectively, and the efficiency coefficient of the 3×1(p) and 3×1(v) groups are 0.86 and 0.84,

respectively. The efficiency coefficient of the post-injection pile groups does not depend on the pile group direction, and the efficiency coefficient of the pile groups parallel and perpendicular to the roof slope are approximately equal. The efficiency coefficient of the post-injection pile groups 2×1 (p) and 2×1 (v) are 0.92 and 0.93, respectively, and the efficiency coefficient of the 3×1 (p) and 3×1 (v) groups are 0.85 and 0.86, respectively.

Table 5. Bearing capacity of pile group

| | | Pile group | | | |
|------------|------------------------|------------|---------|---------|---------|
| | | 2×1 (p) | 2×1 (v) | 3×1 (p) | 3×1 (v) |
| Non-grout | Bearing capacity | 11066 | 12296 | 15854 | 18223 |
| | efficiency coefficient | 0.87 | 0.89 | 0.84 | 0.86 |
| | Tilting | 0.0024 | 0.0001 | 0.0019 | 0.00095 |
| Post Grout | Bearing capacity | 16616 | 17613 | 22978 | 24927 |
| | BCR | 1.50 | 1.43 | 1.45 | 1.37 |
| | efficiency coefficient | 0.92 | 0.93 | 0.85 | 0.86 |
| | Tilting | 0.0013 | 0.00075 | 0.0013 | 0.0007 |

4. Conclusions

The results of this research can be summarized as follows:

- 1) The tilting pile group in the post-grout pile groups is less than the tilting pile group in the non-grout pile group. This was observed in all pile diameters, all pile spacings, and all embedded lengths.
- 2) The effect of the post-grout process on increasing the bearing capacity of pile groups adjacent to the slope is greater than that of pile groups installed on a horizontal ground.
- 3) The effect of the post-grout process on increasing the bearing capacity of pile groups linearly parallel to the slope crest is greater than that of pile groups perpendicular to the slope crest.
- 4) As the number of piles in a linear pile group increases, the effect of the post-grout process on increasing the bearing capacity of the pile group decreases.
- 5) Increasing the pile diameter leads to an increase in the effect of the post-grout process on the bearing capacity of the pile group.
- 6) With an increase in the embedded length of the pile, the effect of the post-grout process on increasing the bearing capacity of the pile group decreased.
- 7) The slope effect on reducing the bearing capacity in post-grout pile groups is less than in non-grout piles.

ظرفیت باربری گروه شمع حفاری شده پس تزریق در مجاورت شیروانی ماسه‌ای

رضا محمدعلی نژاد^{1*}، میثم بیات²

¹ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز

² دانشیار دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد

دریافت: 1403/11/5، بازنگری: 1404/5/9، پذیرش: 1404/6/3، نشر آنلاین: 1404/6/3

چکیده

از گروه شمع به‌عنوان پی ساختمان‌ها، پل‌ها و برج‌های انتقال استفاده می‌گردد. در محیط‌های شهری به‌دلیل عدم امکان استفاده از شمع کوبشی (Driven Pile) معمولاً از شمع‌های حفاری شده که دارای ظرفیت باربری کمتری نسبت به شمع کوبشی هستند، استفاده می‌گردد. یکی از روش‌های متداول افزایش ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده، استفاده از روش تزریق پرفشار دوغاب سیمان در نوک شمع می‌باشد. در خصوص رفتار گروه‌های شمع پس تزریق شده (Post Grouted Drilled Pile) در مجاورت شیروانی تاکنون تحقیقی صورت نگرفته است. در این تحقیق، به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D به بررسی اثر شیروانی ماسه‌ای بر روی ظرفیت باربری، ضریب راندمان و میزان چرخش سرشمع گروه‌های شمع پس تزریق شده پرداخته می‌شود. در این تحقیق، گروه‌های شمع پس تزریق شده 2×2 ، 2×1 و 3×1 با قطر 1، 1/5 و 2 متر، با نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی 01/67، 0/33 و فواصل شمع 3، 4 و 5 برابر قطر شمع، در مجاورت شیروانی ماسه‌ای به ارتفاع 30 متر و شیب 30 درجه به‌صورت سه‌بعدی مدل گردیدند. اثر عوامل مختلفی همانند قطر شمع، نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی و فاصله شمع‌ها از یکدیگر بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده در نوک شمع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، پروسه پس تزریق باعث کاهش چرخش سرشمع گردید. با افزایش فاصله شمع‌ها از یکدیگر و افزایش قطر شمع‌ها، ضریب BCR افزایش یافت. اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری و کاهش چرخش سرشمع گروه شمع خطی (Linear Pile Group) موازی رأس شیروانی، بیشتر از گروه شمع خطی عمود بر رأس شیروانی بود.

کلیدواژه‌ها: گروه شمع، پس تزریق، شیروانی، المان محدود، ظرفیت باربری.

1- مقدمه

کوبشی و ماریپیچ کمتر می‌باشد (O'Neill, 1999). با توجه به این که اجرای شمع جزو بخش‌های پرهزینه ساختمان‌ها می‌باشد، مهندسی به دنبال روش‌هایی هستند که ظرفیت باربری شمع حفاری شده را افزایش داده و در نتیجه هزینه اجرای پی کاهش یابد.

یک روش متداول برای بهبود ظرفیت باربری شمع‌ها، تزریق پرفشار دوغاب سیمان در خاک زیر نوک شمع می‌باشد که از دهه 1960 میلادی در آسیا و اروپا رواج پیدا کرد (Bolognesi و Moretto, 1973؛ Gouvenot و Gabiax؛ Stocker, 1975؛ 1983). در این روش پس از این که مقاومت بتن شمع به حد معینی برسد، دوغاب سیمان از طریق لوله‌های از پیش تعبیه شده در بدنه شمع با فشار زیاد به خاک زیر نوک شمع و یا خاک اطراف جدار شمع تزریق می‌گردد. شمع‌های پس تزریق شده را می‌توان به سه

در حال حاضر، از گروه شمع به‌عنوان پی بسیاری از سازه‌های مهندسی در دریا و خشکی استفاده می‌گردد. در گذشته به‌دلیل مقاومت زیاد جدار و نوک شمع کوبشی، به‌عنوان گزینه اول از شمع‌های کوبشی استفاده می‌گردید (Meyerhof, 1976؛ O'Neill, 1994). اما ارتعاش و آلودگی صوتی ناشی از کوبش دینامیکی شمع، یک مانع مهم جهت استفاده از شمع کوبشی در محیط‌های شهری می‌باشد (Selby, 1991؛ Woods, 1997؛ Deeks و همکاران، 2005؛ Svinkin, 2006).

گزینه‌های دیگر اجرای شمع، استفاده از شمع‌های حفاری شده و ماریپیچ می‌باشد که مشکلات اجرایی شمع کوبشی را ندارند (O'Neill, 1999؛ Brown و همکاران، 2007). ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده به‌دلیل نحوه اجرای آن‌ها نسبت به شمع‌های



Salem و همکاران (2024) به کمک روش المان محدود و نرم افزار PLAXIS3D به بررسی اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ظرفیت باربری شمع‌های منفرد پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان بر روی افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها با افزایش قطر شمع و افزایش قطر حباب دوغاب سیمان تشکیل شده در زیر نوک شمع، بیشتر می‌گردد.

Hu و همکاران (2024) نتایج 708 آزمایش انجام شده بر روی شمع‌های پس تزریق شده را مورد بررسی قرار دادند و بر اساس نتایج آزمایش‌های بررسی شده، نمودارهایی برای محاسبه حجم دوغاب سیمان لازم برای تزریق در نوک شمع و فشار تزریق دوغاب سیمان، بر حسب قطر شمع و نوع خاک ارائه کردند.

Huang و همکاران (2022) به بررسی میزان ارتفاع صعود دوغاب سیمان در امتداد جدار شمع ناشی از تزریق پرفشار دوغاب سیمان در نوک شمع پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که ارتفاع صعود دوغاب سیمان در امتداد جدار شمع با افزایش قطر شمع و افزایش فشار تزریق دوغاب سیمان، افزایش می‌یابد و ارتفاع صعود دوغاب سیمان در امتداد جدار شمع با افزایش طول مدفون شمع، کاهش می‌یابد.

Zhang و همکاران (2024) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی رفتار شمع‌های فولادی پس تزریق شده با مقطع دایره‌ای شکل در خاک چسبنده پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش حجم دوغاب سیمان تزریق شده، ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده افزایش می‌یابد و شمع‌های پس تزریق شده در جدار نسبت به شمع‌های پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار، در زمینه کنترل نشست شمع عملکرد بهتری دارند.

Hu و همکاران (2022) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس واقعی، اثر حجم دوغاب سیمان تزریقی بر روی ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی شمع منفرد با قطر 1/5 و طول مدفون 88 متر که نوک آن در خاک شنی مستقر بود، انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش میزان دوغاب سیمان تزریقی از 250 کیلوگرم به 500 کیلوگرم، افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از پروسه پس تزریق دوغاب سیمان از 35% به 41/7% افزایش یافت و مدول الاستیسیته خاک شنی زیر نوک شمع با توجه به حجم دوغاب تزریقی تا دو برابر افزایش یافت.

Thiyyakkandi (2024) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ به بررسی رفتار شمع‌های پس تزریق شده در نوک پرداخت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش ظرفیت باربری

دسته تقسیم‌بندی کرد (Nguyen و همکاران، 2019؛ Zhou و همکاران، 2024):

- 1) شمع پس تزریق شده در نوک
 - 2) شمع پس تزریق شده در جدار شمع
 - 3) شمع پس تزریق شده در نوک و جدار شمع
- چهار مکانیسم باعث افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک می‌گردد (Loehr و همکاران، 2017):

- 1) بهبود مقاومت جدار شمع ناشی از حرکت رو به بالای شمع و بسیج شدن مقاومت اصطکاکی منفی شمع،
- 2) بهبود مقاومت نوک شمع ناشی از بهبود خواص مقاومتی خاک زیر نوک شمع،

- 3) بهبود مقاومت نوک شمع به دلیل پافیلی شدن نوک شمع،
- 4) بهبود مقاومت جدار شمع ناشی از حرکت روبه بالای دوغاب تزریق شده در امتداد جدار شمع.

اجرای پروسه تزریق پرفشار، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری نوک و جدار شمع، باعث بسیج شدن مقاومت نوک شمع پس تزریق شده نسبت به شمع بدون تزریق در جابه‌جایی قائم کمتری می‌گردد (Zheng, 2018).

اولین بار مؤسسه حمل‌ونقل فلوریدا در خصوص اثر تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی کاهش جابه‌جایی لازم جهت بسیج شدن ظرفیت باربری نوک شمع تحقیق نمود. در دهه اخیر در خصوص ظرفیت باربری و میزان کاهش نشست شمع‌های پس تزریق شده مستقر بر روی زمین مسطح تحقیقات آزمایشگاهی و عددی و تحلیلی زیادی صورت گرفته است (Kong و همکاران، 2022؛ Tao، 2022؛ Wan و همکاران، 2022؛ Liu، 2023؛ Wu و همکاران، 2023؛ Wang و همکاران، 2023؛ Cao، 2024؛ Wu و همکاران، 2024؛ Wang و همکاران، 2024؛ Huang و همکاران، 2024).

Thiyyakkandi و همکاران (2014) به کمک روش المان محدود به بررسی رفتار شمع پس تزریق شده در نوک و شمع بدون تزریق در خاک غیرچسبنده پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که منحنی بار- نشست شمع پس تزریق شده مشابه منحنی بارگذاری مجدد شمع بدون تزریق می‌باشد که در ابتدا تحت باری معادل فشار تزریق دوغاب سیمان قرار گرفته است.

Youn و Tonon (2010) به کمک روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار PLAXIS، شمع پس تزریق شده پل رودخانه برازو¹ در آمریکا را مدل کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مقاومت جدار و نوک شمع پس از اجرای پروسه پس تزریق دوغاب سیمان به ترتیب 47% و 25% افزایش یافت.

Zhou و همکاران (2021) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر پروسه پس تزریق بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش فاصله شمع از یکدیگر تا 5 برابر قطر شمع، ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده در نوک افزایش می‌یابد و پروسه پس تزریق در نوک شمع باعث کاهش ضریب راندمان شمع می‌گردد.

McVay و همکاران (2010) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ به بررسی اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ضریب راندمان گروه شمع 2x2 پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که هنگامی که فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها از یکدیگر سه برابر قطر شمع گردد، ضریب راندمان گروه شمع پس تزریق شده در نوک برابر با 1 می‌گردد.

Bo و همکاران (2011) به بررسی اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری گروه شمع در اثر پروسه پس تزریق تا 40% افزایش می‌یابد و عمق بهینه پس تزریق دوغاب سیمان در زیر نوک شمع، دو برابر قطر شمع می‌باشد.

Jianliang و همکاران (2021) به بررسی اثر پروسه پس تزریق بر روی رفتار گروه شمع در خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش فاصله شمع‌ها از یکدیگر نسبت ظرفیت باربری نوک شمع به ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. Mohammad Alinejad و همکاران (2021، 2023، 2024)

به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی از ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح کمتر می‌باشد و گروه شمع مجاور شیروانی در اثر بارگذاری محوری به سمت شیروانی دوران می‌کند. همچنین نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که میزان تأثیر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری و دوران شمع مجاور شیروانی به طول مدفون شمع، تراکم نسبی خاک، قطر شمع و فاصله شمع از رأس شیروانی دارد. با افزایش طول مدفون شمع، تراکم نسبی خاک، قطر شمع و فاصله شمع از رأس شیروانی، اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری محوری گروه شمع کاهش پیدا می‌کند. مطالعات گسترده‌ای در خصوص ظرفیت باربری پی‌های سطحی مجاور شیروانی‌های مسلح شده با مسلح‌کننده‌های پلیمری همچون ژئوگرید انجام شده است (Niazmandi, 2023). تاکنون تحقیقات کمی در خصوص تزریق دوغاب بر روی ظرفیت باربری انواع پی سطحی و عمیق مجاور شیروانی انجام گرفته است.

شمع پس تزریق شده به فشار تزریق دوغاب سیمان و افزایش قطر شمع ناشی از پروسه تزریق دوغاب سیمان بستگی دارد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در گروه شمع متشکل از شمع‌های پس تزریق شده در نوک، هنگامی که فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها سه برابر قطر شمع‌های بدون پس تزریق باشد، ضریب راندمان برابر با 1 می‌گردد.

Su و همکاران (2023) اثر پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ظرفیت باربری شمع را با انجام آزمایش بر روی شمع با مقیاس واقعی و با قطر 1/2 متر و طول 60 متر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که در خاک شنی، پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع باعث افزایش 50 تا 60 درصدی مقاومت نوک و پروسه پس تزریق در جدار شمع باعث افزایش 26 تا 38 درصدی ظرفیت باربری جدار شمع می‌گردد.

Wang و همکاران (2023) نتایج 23 آزمایش بارگذاری بر روی شمع‌های پس تزریق شده در پروژه بزرگراه تانژای² در نانتونگ³ چین را مورد بررسی قرار دادند. طول مدفون شمع‌ها 80-57 متر و قطر شمع‌ها 1/8 متر بود. نتایج نشان داد که پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی شمع در محدوده 37%-10% و افزایش ظرفیت باربری نوک شمع در محدوده 139%-89% شمع می‌گردد.

Li و همکاران (2024) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی، اثر اضافه کردن مواد پلیمری به دوغاب سیمان بر روی ظرفیت باربری قائم شمع‌های پس تزریق در جدار را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق Li و همکارانش نشان داد که اضافه کردن مواد پلیمری، ظرفیت باربری قائم شمع‌های پس تزریق شده در جدار را تا 40% افزایش می‌دهد.

Liu و همکاران (2022) اثر تزریق جدار بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که پروسه پس تزریق جدار، ظرفیت باربری نهایی شمع را تا 25% افزایش می‌دهد.

Shalabi و همکاران (2023) به کمک روش المان محدود سه‌بعدی به بررسی اندرکنش شمع حفاری شده و سرشمع در خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در یک نسبت طول به قطر شمع معین، با افزایش ضریب الاستیسیته خاک ظرفیت باربری نوک شمع اندکی کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت طول به قطر شمع، ظرفیت باربری نوک شمع افزایش می‌یابد. همچنین نتایج بررسی‌های Shalabi و همکاران (2023) نشان داد با افزایش نسبت طول به قطر شمع، نسبت مقاومت جدار به مقاومت نوک شمع کاهش می‌یابد.

و اثر عواملی همانند قطر شمع، اثر نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی، فاصله شمع‌ها از یکدیگر و جهت گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی خاک بر روی ظرفیت باربری، ضریب راندمان و چرخش سرشمع، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق گروه شمع با 3 قطر مختلف و 3 نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی و 3 فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها از یکدیگر، در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی ماسه‌ای مدل گردید.

2- مدل عددی

در این تحقیق جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار PLAXIS3D استفاده شده است (Salem و همکاران، 2024). با توجه به این که اندازه المان‌های تشکیل‌دهنده مش در مدل‌سازی عددی بر روی نتایج حاصل تأثیرگذار می‌باشد، ابعاد المان‌های مش به گونه‌ای در نظر گرفته شد که بر روی نتایج تأثیرگذار نباشد. ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب گردید که تنش‌های ناشی از بارگذاری به مرزها نزدیک نبوده و اثری روی تنش نهایی نداشته باشند و اثرات احتمالی مرزها را به حداقل برساند (Salem و همکاران، 2024). برای حالت‌ها و اندازه‌های مختلف هندسه مدل، آنالیز حساسیت برای تعیین ابعاد مدل و مش‌ها انجام داده شد. برای مدل‌سازی از شمع با قطر 1، 1/5 و 2 و نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی (L/H) 0/33، 0/67 و 1 (طول مدفون شمع‌ها به ترتیب 10، 20 و 30 متر) در نظر گرفته شد. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها 3، 4 و 5 برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. شیب شیروانی 30 درجه و ارتفاع شیروانی 30 متر در نظر گرفته شد. کلیه شمع‌ها در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی مستقر گردیدند. هرکدام از شمع‌ها در دو حالت بدون پس‌تزیق و پس‌تزیق شده در نوک شمع مدل گردیدند.

برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های با قطر زیاد روش‌های مختلفی وجود دارد. در این تحقیق از روش O'Neill (1999) برای تعیین ظرفیت باربری گروه شمع استفاده گردید. براساس روش O'Neill (1999) ظرفیت باربری گروه شمع در نشست معادل 5% قطر شمع محاسبه می‌گردد. خاک با استفاده از مدل رفتاری سخت شونده مدل گردید. در مدل‌سازی عددی، شمع و حباب دوغاب به کمک مدل الاستیک خطی مدل گردیدند (Salem و همکاران، 2024 و Thiyyakkandi و همکاران، 2014).

پارامترهای خاک و شمع و دوغاب سیمان در جدول (1) ارائه شده است. شیروانی مدل شده برای گروه شمع با قطر 1 و طول مدفون 20 متر، شمع و حباب گروت مدل شده در شکل (1) نشان داده شده است. با توجه به این که شمع‌های این تحقیق در رده شمع‌های با قطر بزرگ قرار می‌گیرند، از المان حجمی برای مدل کردن شمع‌ها استفاده گردید. در جدول (1) چسبندگی ماسه،

به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی Hataf و Abedi (2014) به بررسی اثر تزیق دوغاب بر روی ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تزیق دوغاب سیمان باعث افزایش ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی ماسه‌ای می‌گردد و عمق بهینه تزیق دوغاب، دوبرابر عرض پی نواری می‌باشد.

Xiang و همکاران (2015) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس واقعی، رفتار شمع لوله‌ای فولادی تزیق شده با دوغاب سیمان واقع بر شیروانی را تحت بارگذاری افقی مورد بررسی قرار دادند. قطر شمع مورد استفاده در تحقیق Xiang و همکاران، 140 میلی‌متر بوده که به روش حفاری شده اجرا گردید. قطر گمانه حفاری شده در این تحقیق 180 میلی‌متر بوده و شمع لوله‌ای فولادی در مرکز گمانه حفاری شده قرار گرفته و در مرحله پایانی، گمانه حفاری شده با دوغاب سیمان پر گردید.

نتایج بررسی‌های Xiang و همکاران (2015) نشان داد که میزان جابه‌جایی افقی گروه‌های شمع شامل سه ردیف شمع 50%-35% کمتر از جابه‌جایی افقی گروه‌های شمع شامل دو ردیف شمع می‌باشد.

Wan و همکاران (2022) رفتار شمع لوله‌ای فولادی تزیق شده با دوغاب سیمان واقع بر شیروانی را تحت بارگذاری افقی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش فاصله بین شمع‌ها تا 6 برابر قطر شمع، ظرفیت باربری گروه شمع افزایش می‌یابد و در فواصل بیشتر شمع‌ها از یکدیگر، ظرفیت باربری افقی گروه شمع کاهش می‌یابد. از گروه شمع به‌عنوان پی ساختمان‌های بلندمرتبه، پایه پل‌ها و سازه‌های انتقال نیرو استفاده می‌گردد. برخی این سازه‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی قرار می‌گیرند. قرارگیری گروه شمع‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی باعث کاهش ظرفیت باربری محوری گروه شمع می‌گردد. پروسه پس‌تزیق دوغاب در نوک شمع یکی از روش‌های اقتصادی می‌باشد که در چند دهه اخیر جهت بهبود ظرفیت باربری محوری شمع‌ها و گروه‌های شمع مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات انجام گرفته در خصوص اثر پروسه پس‌تزیق دوغاب بر روی ظرفیت باربری شمع‌ها، محدود به شمع‌های مستقر بر روی زمین مسطح بوده است و تاکنون تحقیقی در خصوص اثر پروسه پس‌تزیق دوغاب بر روی ظرفیت باربری، دوران و جابه‌جایی افقی سرشمع گروه شمع مجاور شیروانی صورت نپذیرفته است. لذا بررسی اثر پروسه پس‌تزیق دوغاب بر روی ظرفیت باربری و دوران و جابه‌جایی افقی سرشمع گروه شمع مجاور شیروانی حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق، به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D به بررسی ظرفیت باربری گروه شمع پس‌تزیق شده مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای پرداخته می‌شود

اطراف وارد گردید. فشار هیدرواستاتیکی تا عمق بحرانی (10 متر زیر سطح زمین) با شیب $22/5 \text{ KN/m}^2/\text{m}$ افزایش می‌یابد و در اعماق بزرگ‌تر از عمق بحرانی فشار هیدرواستاتیکی با شیب $10 \text{ KN/m}^2/\text{m}$ افزایش می‌یابد. در این مرحله جابه‌جایی پیش‌فرض صفر وارد بر سطح بخش حفاری شده مرحله 2 غیرفعال می‌گردد.

4) عمل‌آوری بتن: در این مرحله المان‌های شمع که در مراحل قبل غیرفعال شده بودند، فعال گردیدند و به این المان‌ها مشخصات بتن اختصاص داده می‌شود و فشار هیدرواستاتیکی اعمال شده مرحله قبل غیرفعال می‌گردد.

5) تزریق دوغاب سیمان: جهت مدل کردن تزریق دوغاب سیمان در زیر نوک و اطراف شمع، انبساط حجمی مثبت به خاک اطراف ناحیه تزریق گروت اعمال گردید.

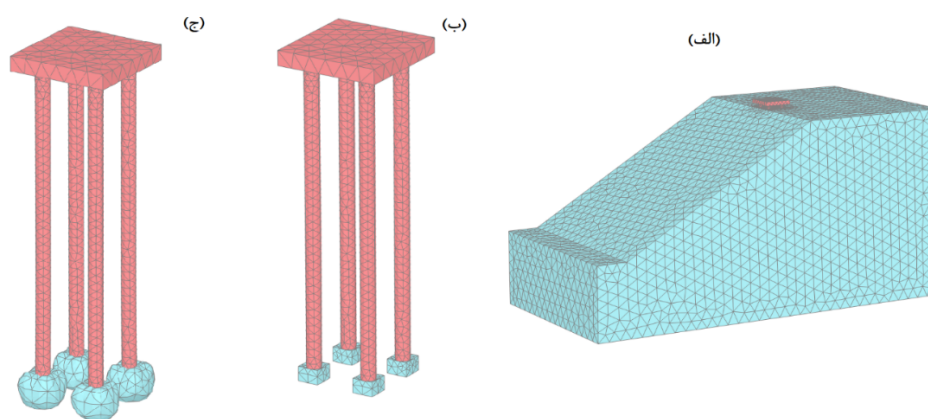
صفر در نظر گرفته شده است اما برای جلوگیری از ناپایداری عددی در حین آنالیز مدل، مقدار چسبندگی کوچکی ($0/345$ کیلوپاسکال) برای خاک ماسه‌ای در نظر گرفته شد (Salem و همکاران، 2024، Thiyyakkandi و همکاران، 2014).

به‌منظور مدل‌سازی پروسه اجرای شمع و پس‌تزریق دوغاب سیمان مراحل زیر در نظر گرفته شد (Thiyyakkandi و همکاران، 2014؛ Mohammad Ai Nejad و Bayat، 2025):

1) تعادل اولیه شیروانی: در این بخش به‌دلیل ناهمسانی مدل به‌دلیل وجود شیروانی، از گزینه بارهای گرانشی در بخش انتخاب نوع محاسبات استفاده گردید.

2) عملیات حفاری و غلاف‌گذاری: عملیات حفاری با غیرفعال کردن المان‌های مش محل استقرار شمع مدل گردید. برای مدل کردن غلاف‌گذاری، جابه‌جایی پیش‌فرض صفر به‌صورت شعاعی در امتداد بخش حفاری شده اعمال گردید.

3) بتن‌ریزی شمع: جهت مدل کردن بتن‌ریزی شمع، فشار هیدرواستاتیکی شعاعی در امتداد جدار بیرونی شمع به خاک



شکل 1- الف) مدل شیروانی سه‌بعدی برای شمع با قطر 1 و طول مدفون 20 متر، ب) گروه شمع و قسمتی از خاک زیر نوک که تحت تأثیر تزریق دوغاب سیمان خواهند گرفت (قبل از اعمال انبساط حجمی جهت مدل کردن پروسه پس‌تزریق دوغاب سیمان)، ج) گروه شمع و حباب گروت تشکیل‌شده اطراف آن (پس از اعمال انبساط حجمی جهت مدل کردن پروسه پس‌تزریق دوغاب سیمان)

جدول 1- مشخصات خاک و شمع و دوغاب سیمان استفاده‌شده در آنالیز عددی (Gavin و Tolooian، 2013)

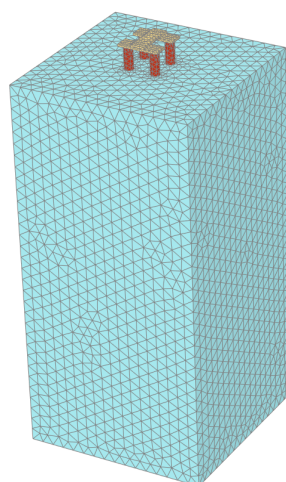
| پارامتر | واحد | ماسه | شمع | گروت |
|-------------------------------|------------------------|------|-------|-------|
| C چسبندگی خاک | کیلو نیوتن | 0 | - | - |
| γ وزن مخصوص | کیلو نیوتن بر متر مکعب | 16 | 25 | 20 |
| (ϕ^0) زاویه اصطکاک خاک | درجه | 34 | - | - |
| زاویه اتساع | درجه | 2/5 | - | - |
| μ ضریب پواسن | - | 0/3 | 0/2 | 0/2 |
| E_{20}^{ref} سختی سکانتی | مگاپاسکال | 20 | - | - |
| E_{100}^{ref} سختی مماسی | مگاپاسکال | 25 | - | - |
| E_{10}^{ref} سختی باربرداری | مگاپاسکال | 120 | - | - |
| m | - | 0/5 | - | - |
| n پوکی | - | 0/6 | - | - |
| E مدول الاستیسیته | مگاپاسکال | - | 30000 | 20000 |

2-1- اعتبارسنجی

برای بررسی توانایی مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار PLAXIS3D جهت بررسی رفتار گروه شمع پس‌تزیق شده، آزمایش انجام شده توسط Thiyyakkandi و همکاران (2014) بر روی گروه شمع 2×2 و شمع پس‌تزیق شده در نوک شمع یا قطر $0/216$ و طول مدفون $3/4$ متر با فاصله شمع‌های 3d مدل گردید. نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایش شمع که به صورت نمودار بار-نشست می‌باشد، مقایسه گردید. از مدل سخت شونده برای مدل کردن رفتار خاک و از مدل الاستیک خطی برای مدل کردن شمع و حباب دوغاب استفاده گردید. پارامترهای مورد استفاده در مدل کردن خاک در جدول (3) و پارامترهای مورد استفاده برای مدل کردن شمع و حباب دوغاب سیمان در جدول (1) ارائه شده است. نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود با نتایج آزمایش مدل فیزیکی، همخوانی خوبی دارد (شکل (3)) و نشان‌دهنده توانایی روش المان محدود و مدل رفتاری سخت شونده در مدل‌سازی رفتار شمع پس‌تزیق شده می‌باشد.

جدول 3- مشخصات خاک استفاده شده در آنالیز عددی

| پارامتر | واحد | ماده |
|-------------------------------|------------------------|------|
| C چسبندگی خاک | کیلو نیوتن | 0 |
| γ وزن مخصوص | کیلو نیوتن بر متر مکعب | 15/7 |
| (ϕ) زاویه اصطکاک خاک | درجه | 31 |
| زاویه اتساع | درجه | 1 |
| μ ضریب پواسن | - | 0/3 |
| E_{90}^{ref} سختی سکانتی | مگاپاسکال | 17 |
| E_{cde}^{ref} سختی مماسی | مگاپاسکال | 15 |
| E_{ur}^{ref} سختی باربرداری | مگاپاسکال | 51 |
| m | - | 0/5 |



شکل 2- گروه شمع مدل شده با ابعاد $5 \times 5 \times 10$ متر به همراه تیرهای فولادی قرار گرفته در بالای شمع‌ها جهت اعمال بار

مدل‌سازی تزیق دوغاب به کمک اعمال کرنش حجمی مثبت در تمامی جهات در نرم‌افزار PLAXIS3D توسط محققین مختلفی پیشنهاد شده است. اعمال کرنش حجمی مثبت باعث فشرده شدن خاک زیر نوک شمع (مدل‌سازی پیش تنش اعمالی توسط فشار تزیق) و حرکت رو به بالای شمع می‌گردد. حرکت رو به بالای شمع موجب بسیج شدن مقاومت اصطکاکی منفی در امتداد جدار شمع همانند شرایط واقعی می‌گردد. میزان انبساط حجمی اعمالی برای مدل‌سازی تزیق پرفشار دوغاب، وابسته به حجم دوغاب تزیقی و پوکی خاک می‌باشد. برای مدل‌سازی تزیق دوغاب در نوک شمع حجم مکعب مستطیلی از خاک که سطح مقطع آن برابر با $2/78$ برابر قطر شمع و ارتفاع $0/7$ متر باشد، در نظر گرفته می‌شود (شکل (1-ب)) سپس با توجه به مقدار نسبت پوکی خاک، حجم حفرات مکعب مستطیل خاک مدنظر در زیر نوک شمع (شکل (1-ب)) تعیین شده و با مقایسه حجم دوغاب تزیق شده، میزان کرنش حجمی مکعب مستطیل مشخص می‌گردد. جهت مدل‌سازی تزیق دوغاب در نرم‌افزار PLAXIS3D در فاز محاسبات، گزینه کرنش حجمی برای مکعب‌های ذکر شده در بالا فعال گردیده و مقدار کرنش حجمی مثبت مدنظر تعریف می‌گردد. با توجه به این‌که تزیق دوغاب در محدوده کرنش‌های بزرگ می‌باشد در مرحله مدل‌سازی دوغاب گزینه به‌روزرسانی مش فعال می‌گردد. آنالیز مش به‌روز شده در PLAXIS یک روش محاسباتی براساس فرمولاسیون لاگرانژی به‌روز شده برای در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد. در این حالت نرم‌افزار، مش‌های مدل المان محدود و ماتریس سختی را در محاسبات به‌روز کرده و به ارزیابی مجدد تنش‌ها و کرنش‌های درون مش ادامه می‌دهد.

(6) عمل آوری دوغاب سیمان: در این مرحله مشخصات خاک بخش منبسط شده با مشخصات دوغاب سیمان جایگزین می‌گردد. (7) بارگذاری شمع: در این مرحله جهت مدل کردن بارگذاری، بارمحوری بر روی شمع اعمال می‌گردد.

حجم گروت تزیق شده در هر آنالیز به کمک آیین‌نامه JGJ106-2014 چین (Gavin و Tolooyan, 2013) تعیین گردید و در جدول (2) ارائه شده است.

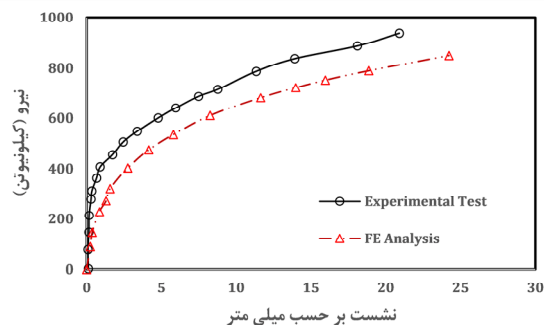
جدول 2- حجم دوغاب سیمان نوک و جدار شمع برای قطرهای

مختلف شمع

| قطر شمع | حجم دوغاب سیمان نوک شمع (لیتر) |
|---------|--------------------------------|
| 1 | 1200 |
| 1/5 | 1800 |
| 2 | 2400 |

(2021) همخوانی دارد. دلیل این امر، افزایش سختی جانی گروه شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها و در نتیجه کاهش دوران سرشمع می‌باشد. نتایج جدول (4) و شکل (4) نشان می‌دهند که، با افزایش فاصله شمع‌ها ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده با نتایج Zhou و همکاران (2021) همخوانی دارد. افزایش ظرفیت باربری گروه‌های شمع پس تزریق شده به دلیل افزایش ناشی از افزایش فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع مجاور شیروانی بیش از گروه‌های شمع مستقر بر روی زمین مسطح می‌باشند. افزایش فاصله شمع‌ها از 3d به 5d، ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مستقر بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی به ترتیب 14% و 24% می‌باشد. این امر به دلیل این موضوع می‌باشد که، پروسه پس تزریق در شمع‌های مجاور شیروانی علاوه بر مکانیسم چهارگانه افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق، باعث کاهش دوران شمع مجاور شیروانی می‌گردد و این امر باعث تأثیر بیشتر پروسه تزریق دوغاب بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده در مجاور شیروانی نسبت به گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح می‌شود. برای بیان میزان افزایش ظرفیت باربری گروه شمع ناشی از پروسه پس تزریق از ضریب نسبت ظرفیت باربری، BCR، (نسبت ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده به ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق) استفاده می‌گردد. نتایج جدول (4) نشان می‌دهد که با افزایش فاصله شمع‌ها ضریب BCR افزایش می‌یابد و ضریب BCR گروه شمع مجاور شیروانی از ضریب BCR گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح بیشتر می‌باشد. این امر به دلیل اثر پروسه پس تزریق بر روی کاهش دوران سرشمع گروه شمع مجاور شیروانی می‌باشد. با افزایش فاصله شمع‌ها از 3d به 5d ضریب BCR برای گروه‌های شمع پس تزریق شده مستقر بر زمین مسطح و مجاور شیروانی به ترتیب در محدوده 1/30-1/35 و 1/35-1/39 می‌باشد.

برای بیان مقایسه نتایج جدول (4) نشان می‌دهد که در شمع‌های مستقر بر روی زمین مسطح، ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق از ضریب راندمان گروه شمع پس تزریق شده در نوک بیشتر می‌باشد. نتایج به‌دست آمده با نتایج آزمایش‌های Zhou و همکاران (2021) همخوانی دارد. نتایج جدول (4) نشان می‌دهد که در شمع‌های مجاور شیروانی، ضریب راندمان گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده با افزایش فاصله شمع‌ها از یکدیگر، افزایش می‌یابد. افزایش ضریب راندمان به دلیل افزایش فاصله شمع‌ها در گروه شمع پس تزریق شده در نوک از افزایش ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق بیشتر می‌باشد. دلیل این امر، تأثیر پافیلی شدن نوک شمع پس تزریق بر روی کاهش دوران شمع‌ها می‌باشد. با افزایش فاصله شمع‌ها از 3d به 5d، ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 20% و 24% افزایش یافت.



شکل 3- منحنی بار- نشست حاصل از آنالیز المان محدود تحقیق حاضر و آزمایش مدل فیزیکی (Thiyyakkandi و همکاران (2014))

3- نتایج عددی

3-1- مقایسه ظرفیت باربری شمع مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح

در این بخش گروه شمع پس تزریق شده در نوک و شمع بدون پس تزریق در زمین مسطح و در مجاورت شیروانی ماسه‌ای مدل گردید. ظرفیت باربری شمع در نسبت نشست 5% محاسبه گردید. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها 3، 4 و 5 برابر قطر شمع (d)، ارتفاع شیروانی 30 متر و زاویه شیروانی 30 درجه، عمق مدفون شمع‌ها 20 متر و قطر شمع‌ها 1 متر در نظر گرفته شد. در شکل (4)، مقادیر ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی ارائه شده است. نتایج جدول (4) نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین شمع‌ها، دوران سرشمع (نسبت تفاوت جابه‌جایی قائم دو لبه سرشمع به طول سرشمع) در گروه شمع‌های پس تزریق شده و بدون تزریق کاهش می‌یابد. دلیل این امر، افزایش سختی جانبی گروه شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها می‌باشد. مقایسه نتایج جدول (4) نشان می‌دهد دوران سرشمع گروه‌های شمع پس تزریق شده مجاور شیروانی از دوران سرشمع گروه شمع بدون تزریق کمتر می‌باشد. دلیل این امر، پافیلی شدن نوک شمع ناشی از پروسه پس تزریق می‌باشد. با افزایش فاصله شمع‌ها اثر پروسه پس تزریق بر روی کاهش دوران بیشتر می‌گردد. میزان کاهش دوران سرشمع گروه‌های شمع پس تزریق شده نسبت به دوران گروه‌های شمع بدون تزریق برای فواصل شمع 3d، 4d و 5d به ترتیب 47%، 53% و 60% می‌باشد.

نتایج جدول (4) و شکل (4) نشان می‌دهند که، ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق مستقر بر روی زمین مسطح، با شمع‌های 4d، از ظرفیت باربری گروه شمع با فواصل شمع‌های 3d و 5d بیشتر است. اما در گروه شمع بدون تزریق شده مجاور شیروانی با افزایش فاصله بین شمع‌ها ظرفیت باربری گروه شمع افزایش می‌یابد که با نتایج Mohammad AliNejad و همکاران

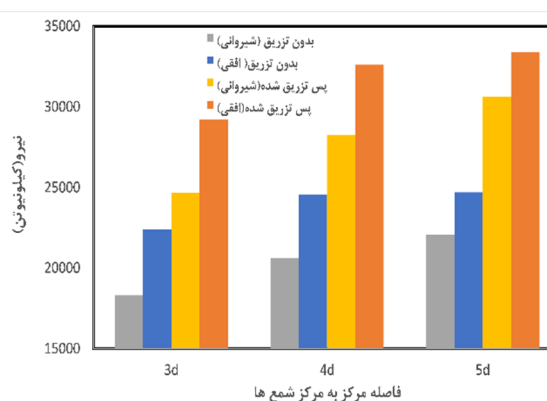
جدول 4- ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی

| | | فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها (برحسب قطر شمع‌ها) | | | |
|---------------|--------------|--|--------|--------|--------|
| | | 3 | 4 | 5 | |
| زمین مسطح | بدون تزریق | ظرفیت باربری | 22392 | 25725 | 24682 |
| | | ضریب راندمان | 0/78 | 0/9 | 0/86 |
| | پس تزریق شده | ظرفیت باربری | 29203 | 32603 | 33320 |
| | | ضریب راندمان | 0/73 | 0/81 | 0/83 |
| مجاور شیروانی | بدون تزریق | BCR | 1/30 | 1/33 | 1/35 |
| | | ظرفیت باربری | 18306 | 20639 | 22074 |
| | پس تزریق شده | ضریب راندمان | 0/66 | 0/75 | 0/8 |
| | | RF | 0/81 | 0/84 | 0/89 |
| مجاور شیروانی | بدون تزریق | دوران سرشمع | 0/0026 | 0/0019 | 0/0015 |
| | | ظرفیت باربری | 24678 | 28369 | 30612 |
| | پس تزریق شده | ضریب راندمان | 0/65 | 0/75 | 0/8 |
| | | RF | 0/85 | 0/88 | 0/92 |
| | | BCR | 1/35 | 1/37 | 1/39 |
| | | دوران سرشمع | 0/0014 | 0/0009 | 0/0006 |

2-3- اثر قطر شمع

در این بخش، تأثیر قطر شمع بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مورد بررسی قرار گرفت. شمع‌ها با قطر 1، 1/5 و 2 متر در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی ماسه‌ای مدل گردیدند. ارتفاع شیب 30 متر و زاویه شیروانی 30 درجه در نظر گرفته شد. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها 4 برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. شمع‌ها با طول مدفون 20 متر و نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی 0/67، در دو حالت بدون پس تزریق و پس تزریق شده در نوک مدل گردیدند. نتایج جدول (5) نشان می‌دهد که افزایش قطر شمع باعث افزایش ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع می‌گردد. افزایش ظرفیت باربری گروه شمع ناشی از افزایش قطر در گروه‌های شمع‌های پس تزریق شده از گروه‌های شمع‌های بدون تزریق بیشتر می‌باشد. با افزایش قطر شمع از 1 به 2 متر ظرفیت باربری گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 2/74 و 3/08 برابر می‌گردد. افزایش ضریب راندمان گروه شمع ناشی از افزایش قطر در گروه‌های شمع‌های پس تزریق شده بیشتر می‌باشد. با افزایش قطر شمع از 1 به 2 متر ضریب راندمان گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 16% و 5% افزایش می‌یابد. نتایج جدول (5) و شکل (5) نشان داد که با افزایش قطر شمع ضریب BCR افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش فشار دوغاب تزریقی در نوک شمع با افزایش قطر شمع می‌باشد. افزایش فشار دوغاب تزریقی باعث افزایش پیش فشردگی خاک زیر نوک شمع می‌باشد. ضریب BCR برای گروه شمع با قطر 1، 1/5 و 2 متر به ترتیب 1/37، 1/41 و 1/55 می‌باشد. با افزایش قطر شمع از 1 به 2 متر، ضریب BCR، 13% افزایش یافت.

اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری از ضریب کاهش ظرفیت باربری، RF (نسبت ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی به ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح) استفاده می‌گردد. ضریب RF در گروه شمع پس تزریق شده مجاور شیروانی از ضریب RF در گروه شمع بدون تزریق بیشتر می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری گروه‌های شمع پس تزریق شده کمتر از شمع‌های بدون تزریق می‌باشد. نتایج شکل (4) نشان می‌دهد که، در یک فاصله شمع معین، ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مجاور شیروانی از ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق مستقر بر روی زمین مسطح بیشتر می‌باشد. ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مجاور شیروانی نسبت به ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق مستقر بر روی زمین مسطح برای فواصل شمع 3d، 4d و 5d، به ترتیب 9%، 11% و 24% بیشتر می‌باشد.

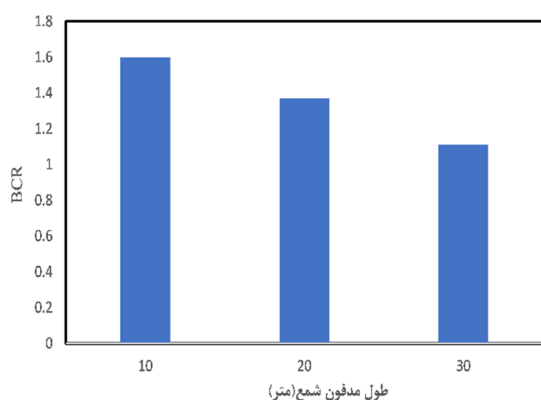


شکل 4- ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح

2/59 برابر گردید. برای درک بهتر اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده، تغییرات ضریب BCR با قطر شمع در شکل (6) ترسیم شده است. نتایج شکل (6) نشان می‌دهد که با افزایش طول مدفون شمع ضریب BCR کاهش می‌یابد. این نتایج با نتایج Ma و همکاران (2023) در خصوص شمع پس تزریق منفرد همخوانی دارد. با افزایش طول مدفون از 10 به 30 متر ضریب BCR، 31% کاهش می‌یابد. نتایج جدول (6) نشان می‌دهد که، ضریب راندمان گروه‌های شمع با افزایش طول مدفون کاهش می‌یابد. با افزایش طول مدفون شمع از 10 متر به 30 متر، ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 20% و 22% کاهش می‌یابد. با افزایش طول مدفون شمع میزان چرخش سرشمع گروه شمع کاهش یافت. میزان اثر پروسه پس تزریق بر روی کاهش میزان چرخش سرشمع با افزایش طول مدفون سرشمع کاهش یافت. میزان کاهش چرخش سرشمع ناشی از پروسه پس تزریق برای گروه شمع با طول مدفون 10، 20 و 30 متر به ترتیب 37%، 26% و 20% می‌باشد.

جدول 6- ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع بدون پس تزریق و پس تزریق شده واقع در زمین مسطح و مجاور

| شیروانی | طول مدفون شمع (متر) | | | |
|--------------|---------------------|--------|--------|--------|
| | 10 | 20 | 30 | |
| بدون تزریق | ظرفیت باربری | 9539 | 20639 | 35672 |
| | ضریب راندمان | 0/91 | 0/75 | 0/73 |
| | چرخش سرشمع | 0/0027 | 0/0019 | 0/001 |
| پس تزریق شده | ظرفیت باربری | 15302 | 28369 | 39674 |
| | BCR | 1/6 | 1/37 | 1/11 |
| | ضریب راندمان | 0/83 | 0/75 | 0/65 |
| | چرخش سرشمع | 0/0017 | 0/0014 | 0/0008 |

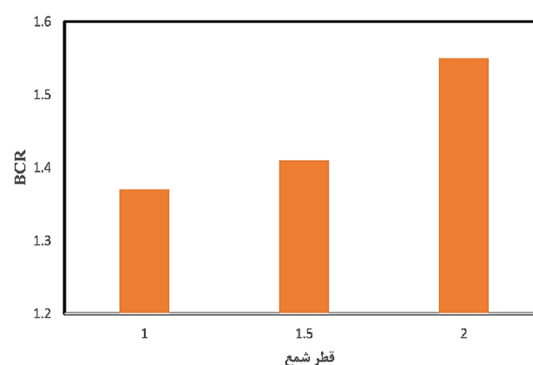


شکل 6- تغییرات ضریب BCR با طول مدفون شمع

جدول 5- ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع بدون پس تزریق و پس تزریق شده واقع در زمین مسطح و مجاور شیروانی

| | | قطر شمع (متر) | | |
|--------------|--------------|---------------|--------|--------|
| | | 1 | 1/5 | 2 |
| بدون تزریق | ظرفیت باربری | 20639 | 38201 | 56460 |
| | ضریب راندمان | 0/75 | 0/77 | 0/87 |
| | چرخش سرشمع | 0/0019 | 0/0023 | 0/003 |
| پس تزریق شده | ظرفیت باربری | 28369 | 53500 | 87354 |
| | BCR | 1/37 | 1/41 | 1/55 |
| | ضریب راندمان | 0/75 | 0/76 | 0/79 |
| | چرخش سرشمع | 0/0014 | 0/0015 | 0/0018 |

نتایج جدول (5) نشان داد که میزان چرخش سرشمع در شمع‌های پس تزریق شده کمتر از مقادیر پیشنهادی (0/002) بوده اما در گروه‌های شمع بدون تزریق با قطر 1/5 و 2 متر میزان چرخش سرشمع از مقدار حداکثر پیشنهادی بیشتر می‌باشد.



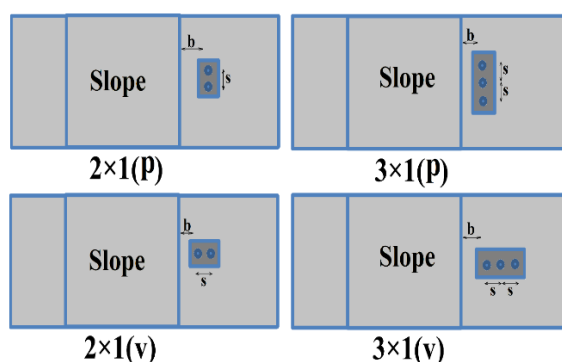
شکل 5- تغییرات ضریب BCR با قطر شمع

3-3- اثر نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی

در این بخش، به بررسی اثر نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی ماسه‌ای (L/H) بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده پرداخته می‌شود. شمع‌ها با نسبت‌های L/H، 0/33، 0/67 و 1 (با طول مدفون به ترتیب 10، 20 و 30 متر) در دو حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک در مجاورت شیروانی ماسه‌ای مدل گردیدند. ارتفاع شیب 30 متر و زاویه شیروانی 30 درجه در نظر گرفته شد. نتایج جدول (6) نشان داد که با افزایش طول مدفون شمع ظرفیت باربری گروه شمع افزایش یافت و این افزایش ظرفیت باربری در گروه شمع بدون تزریق از گروه شمع تزریق شده بیشتر می‌باشد. که این امر نشان‌دهنده کاهش تأثیر پروسه پس تزریق بر افزایش ظرفیت باربری با افزایش طول مدفون شمع می‌باشد. با افزایش طول مدفون از 10 به 30 متر ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 2/74 و

3-4- اثر جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی

در این بخش، تأثیر جهت قرارگیری گروه شمع خطی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مورد بررسی قرار گرفت (شکل (7)). شمع‌ها با قطر 1 متر در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی ماسه‌ای مدل گردیدند. ارتفاع شیب 30 متر و زاویه شیروانی 30 درجه در نظر گرفته شد. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها 4 برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. شمع‌ها با طول مدفون 20 متر و نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی 0/67، در دو حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک مدل گردیدند.



شکل 7- نحوه قرارگیری گروه‌های شمع خطی نسبت به رأس شیروانی

جدول (7) نشان می‌دهد که، ظرفیت باربری گروه شمع خطی عمود بر رأس شیروانی از ظرفیت باربری گروه شمع موازی شیروانی بیشتر می‌باشد. این امر به دلیل سختی بیشتر گروه‌های شمع عمود بر راستای شیروانی نسبت به گروه‌های شمع موازی رأس شیروانی می‌باشد. مقایسه نتایج جدول (7) نشان می‌دهد که اثر جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری در گروه شمع پس تزریق شده کمتر از گروه شمع بدون تزریق می‌باشد. دلیل این امر، تأثیر بیشتر پایداری شدن نوک شمع بر روی کاهش چرخش سرشمع در شمع‌های موازی شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی می‌باشد. ظرفیت باربری گروه شمع $2 \times 1(v)$ در گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 11% و 6% بیشتر از ظرفیت باربری گروه شمع $2 \times 1(p)$ می‌باشد و ظرفیت باربری گروه شمع $3 \times 1(v)$ در گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 15% و 8% بیشتر از ظرفیت باربری گروه شمع $3 \times 1(p)$ می‌باشد. برای درک بهتر اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه‌های شمع خطی، ضریب BCR گروه‌های شمع خطی در شکل (8) ترسیم شده است. ضریب BCR گروه‌های شمع موازی شیروانی از ضریب BCR گروه‌های شمع عمود بر شیروانی بیشتر می‌باشد. ضریب BCR گروه‌های $2 \times 1(p)$ و $2 \times 1(v)$ به ترتیب 1/50 و 1/43 و ضریب BCR گروه‌های $3 \times 1(p)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب 1/45 و 1/37 می‌باشد. با افزایش تعداد شمع‌های گروه شمع خطی، ضریب BCR اندکی کاهش می‌یابد. ضریب BCR گروه شمع $2 \times 1(p)$ ، 3% بیشتر از ضریب BCR گروه شمع $3 \times 1(p)$ می‌باشد و ضریب BCR گروه شمع $2 \times 1(v)$ ، 4% بیشتر از ضریب BCR گروه شمع $3 \times 1(v)$ می‌باشد. ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق موازی شیروانی از گروه شمع عمود بر رأس شیروانی بیشتر می‌باشد و با افزایش تعداد شمع‌های گروه خطی ضریب راندمان کاهش می‌یابد. این نتایج با نتایج Mohammad AliNejad و همکاران (2021) همخوانی دارد. ضریب راندمان گروه‌های شمع بدون تزریق $2 \times 1(p)$ و $2 \times 1(v)$ به ترتیب 0/89 و 0/89 و ضریب راندمان گروه‌های $3 \times 1(p)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب 0/86 و 0/84 می‌باشد.

نتایج جدول (7) نشان می‌دهد که میزان چرخش سرشمع گروه شمع پس تزریق شده از چرخش سرشمع گروه شمع بدون تزریق کمتر می‌باشد. کاهش در چرخش سر شمع به دلیل پروسه پس تزریق در شمع‌های موازی رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. میزان کاهش در چرخش سرشمع ناشی از پروسه پس تزریق در گروه‌های شمع $2 \times 1(p)$ و $3 \times 1(p)$ به ترتیب 46% و 32% و میزان کاهش در چرخش سرشمع ناشی از پروسه پس تزریق در گروه‌های شمع $2 \times 1(v)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب 25% و 23% می‌باشد. نتایج

جدول 6- ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع خطی بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی

| | | گروه شمع | | | |
|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | $2 \times 1(p)$ | $2 \times 1(v)$ | $3 \times 1(p)$ | $3 \times 1(v)$ |
| بدون تزریق | ظرفیت باربری | 11066 | 12296 | 15854 | 18223 |
| | ضریب راندمان | 0/87 | 0/89 | 0/84 | 0/86 |
| | چرخش سرشمع | 0/0024 | 0/001 | 0/0019 | 0/00095 |
| پس تزریق شده | ظرفیت باربری | 16616 | 17613 | 22978 | 24927 |
| | BCR | 1/50 | 1/43 | 1/45 | 1/37 |
| | ضریب راندمان | 0/92 | 0/93 | 0/85 | 0/86 |
| | چرخش سرشمع | 0/0013 | 0/00075 | 0/0013 | 0/0007 |

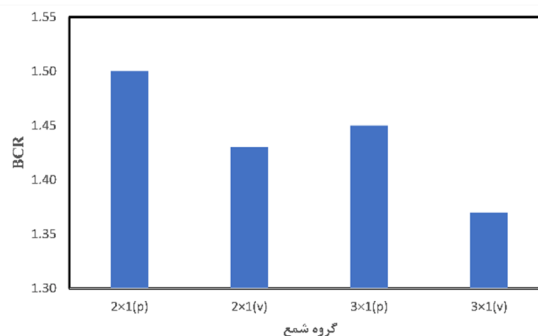
نتایج شکل (9) نشان می‌دهد که محدوده تحت تأثیر بارگذاری در بالای گروه شمع بزرگتر می‌باشد و این محدوده در حرکت به سمت نوک شمع کاهش می‌یابد. همچنین شکل (9) نشان می‌دهد که عرض محدوده تحت تأثیر در گروه شمع پس‌تزریق شده از گروه شمع بدون پس‌تزریق، بزرگتر می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

از گروه شمع به‌عنوان پی ساختمان‌ها، پل‌ها و برج‌های انتقال استفاده می‌گردد. برخی از این سازه‌ها در مجاورت شیروانی ساخته می‌شوند. استقرار گروه‌های شمع در مجاور شیروانی، باعث کاهش ظرفیت باربری و دوران سرشمع گروه شمع به سمت شیروانی در اثر بارگذاری محوری می‌گردد. مهندسی به‌دنبال راهکارهایی برای افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها و در نتیجه کاهش هزینه‌های اجرای شمع می‌باشند. یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده استفاده از روش پس‌تزریق دوغاب سیمان می‌باشد. در این تحقیق، اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس‌تزریق شده در نوک به کمک روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. در آنالیزهای انجام شده اثرات قطر شمع، نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی و فاصله شمع‌ها از یکدیگر و جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بر ظرفیت باربری گروه شمع پس‌تزریق شده در نسبت نشست 5% میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق می‌تواند برای بهبود ظرفیت باربری گروه شمع‌های پی پل‌ها و سازه‌های مجاور شیروانی و در نتیجه، کاهش تعداد شمع‌ها و کاهش هزینه اجرای پی توسط مهندسی مورد استفاده قرار گیرد.

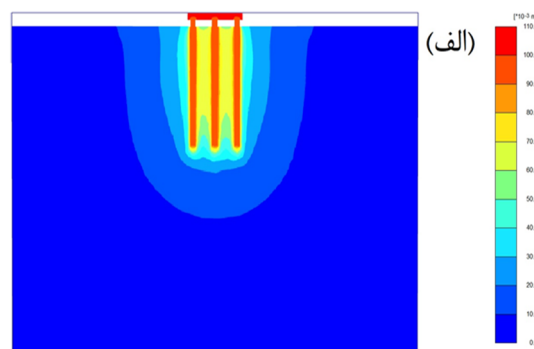
(1) میزان چرخش سرشمع در گروه‌های شمع پس‌تزریق شده از میزان چرخش سرشمع گروه شمع بدون تزریق کمتر می‌باشد. این موضوع در تمامی قطرهای شمع و تمامی فواصل شمع‌ها از یکدیگر و طول‌های مدفون مشاهده گردید. دلیل این موضوع پافیلی شدن نوک شمع ناشی از پروسه تزریق و تشکیل حباب دوغاب سیمان می‌باشد.

(2) اثر پروسه پس‌تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی بیشتر از گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح می‌باشد. این امر به دلیل این موضوع می‌باشد که، پروسه پس‌تزریق در شمع‌های مجاور شیروانی علاوه بر مکانیسم چهارگانه افزایش ظرفیت باربری شمع پس‌تزریق، باعث کاهش دوران شمع مجاور شیروانی می‌گردد. برای گروه شمع با طول مدفون 20 متر و فواصل شمع 3 تا 5 برابر قطر شمع، ضریب BCR گروه شمع پس‌تزریق شده در مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح به ترتیب در محدوده 1/35-1/30 و 1/39-1/35 می‌باشد.



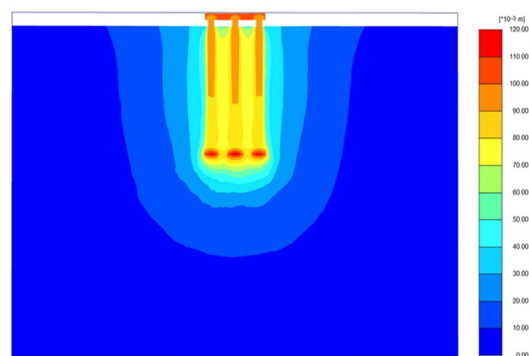
شکل 8- تغییرات ضریب BCR گروه‌های شمع خطی

ضریب راندمان گروه شمع‌های پس‌تزریق شده به جهت گروه شمع بستگی ندارد و ضریب راندمان گروه شمع موازی و عمود بر رأس شیروانی تقریباً برابر می‌باشند. ضریب راندمان گروه‌های شمع پس‌تزریق شده $2 \times 1(p)$ و $2 \times 1(v)$ به ترتیب 0/92 و 0/93 و ضریب راندمان گروه‌های $3 \times 1(p)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب 0/85 و 0/86 می‌باشد. شکل (9) کانتورهای جابه‌جایی برای گروه شمع $3 \times 1(p)$ (برش عرضی از مدل) و برای حالت‌های بدون پس‌تزریق و پس‌تزریق شده در نوک را نشان می‌دهد.



Total displacements |u| (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.1001 m



Total displacements |u| (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.1177 m

(ب)

شکل 9- کانتور تغییرشکل $3 \times 1(p)$: الف) گروه شمع بدون

پس‌تزریق، ب) گروه شمع پس‌تزریق شده

- Cao S, Wang Q, Ma J, Xiao Z, Li C, Yang Y, Wang J, "Experimental investigation of vertical bearing characteristics of composite post-grouting piles in sandy soil", *International Journal of Civil Engineering*, 2024, 22 (2), 303-315.
<http://dx.doi.org/10.1007/s40999-023-00899-1>
- Deeks AD, White DJ, Bolton MD, "A comparison of jacked, driven and bored piles in sand", *The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Amsterdam. 2005.
- Gouvenot D, Gabiax FD, "A new foundation technique using piles sealed by concrete under high pressure", *The 7th Annual Offshore Technical Conference*, 1974, 2, Houston, Texas.
- Hu H, Jin Q, Yang F, Zhou J, Ma J, Gong X, Guo J "A novel method for testing the effect of base post-grouting of super-long piles", *Applied Sciences*, 2021, 12 (21), 10996. <https://doi.org/10.3390/app122110996>
- Hu T, Wan Z, Dai G, Gong W, Fang B, "Prediction and design of grouting parameters for long and large-diameter postgrouted drilled shafts", *International Journal of Geomechanics*, 2024, 24 (2).
<http://dx.doi.org/10.1061/JGNAI.GMENG-8965>
- Huang L, Gao R, Chi J, Yan X, "Study on load-bearing behaviors of prestressed post-grouting tubular piles in the karst region of northern Fujian Province, China", *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12.
<http://dx.doi.org/10.3389/feart.2024.1387028>
- Huang SG, Zhang T, Cao H, "A calculation model of grout migration height for post-grouting technology", *Applied Sciences*, 2022, 12 (13), 6327.
<https://doi.org/10.3390/app12136327>
- Jianliang YE, Shicai C, Xiaohu Wu, "Pile group effect for base post-grouting", *Structural Engineers*, 2021, 30. JGJ 106-2014, "Technical Code for Testing of Building Foundation Piles", Beijing, China Architecture and Building Press. Beijing.
- Kong D, Li H, Gan W, "Study on vertical load-carrying capacity of post-grouting bored piles", *Applied Sciences*, 2022 12 (15), 7452.
<https://doi.org/10.3390/app12157452>
- Loehr JE, Marinucci A, Duffy PH, Gomez J, Robinson H, Day T, Cadden A, "Evaluation and guidance development for post-grouted drilled shafts for highways", Washington, Federal Highway Administration, 2017, 30-35.
- Li P, Xia Y, Xie X, Wang J, Wang C, Shi M, Wu H, "Study on vertical bearing capacity of pile foundation with distributed geopolymer post-grouting on pile side", *Materials*, 2024, 17 (2), 398.
<https://doi.org/10.3390/ma17020398>
- Liu X, Liu Y, Liu K, Su Y, "Experimental investigation on anti-sliding performance of grouted micro-pipe pile groups", *Natural Hazards*, 2022, 113 (2), 1367-1384. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05351-6>
- Liu SW, Zhang QQ, Li HT, Yu XT, Liu GH, Cui W, "An analysis method for the response of combined side-and-tip grouting pile", *Acta Geotechnica*, 2023, 18 (7), 3715-3729.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11440-022-01788-y>
- Mahboubi Niazmandi M, "Estimation of the undrained bearing capacity of strip foundations on two-layer clay soils adjacent to the geogrid-stabilized slope (3) اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع خطی موازی رأس شیروانی بیشتر از گروه شمع عمود بر رأس شیروانی می باشد. این امر به دلیل اثر بیشتر پروسه پس تزریق بر روی کاهش دوران سرشمع گروه شمع خطی موازی شیروانی می باشد. ضریب BCR گروه های شمع $2 \times 1 (v)$ و $2 \times 1 (p)$ به ترتیب $1/50$ و $1/43$ و ضریب BCR گروه های شمع $3 \times 1 (p)$ و $3 \times 1 (v)$ به ترتیب $1/45$ و $1/37$ می باشد.
- (4) با افزایش تعداد شمع های گروه شمع خطی، اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع کاهش می یابد ضریب BCR گروه شمع $2 \times 1 (p)$ ، 3% بیشتر از ضریب BCR گروه شمع $3 \times 1 (p)$ می باشد و ضریب BCR گروه شمع $2 \times 1 (v)$ ، 4% بیشتر از ضریب BCR گروه شمع $3 \times 1 (v)$ می باشد.
- (5) افزایش قطر شمع باعث افزایش اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ضریب BCR گروه شمع می گردد. این امر به دلیل افزایش فشار دوغاب تزریقی در نوک شمع با افزایش قطر شمع می باشد. افزایش فشار دوغاب تزریقی باعث افزایش پیش فشردگی خاک زیر نوک شمع می باشد. ضریب BCR برای گروه شمع با قطر 1، $1/5$ و 2 متر به ترتیب $1/37$ ، $1/41$ و $1/55$ می باشد. با افزایش قطر شمع از 1 به 2 متر، ضریب BCR، 13% افزایش یافت.
- (6) با افزایش طول مدفون شمع تأثیر پروسه پس تزریق بر افزایش ظرفیت باربری گروه شمع، کاهش یافت. با افزایش طول مدفون از 10 متر به 30 متر ضریب BCR از $1/6$ به $1/11$ کاهش یافت.
- (7) اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع پس تزریق شده کمتر از شمع بدون تزریق می باشد. دلیل این امر اثر پروسه پس تزریق بر روی کاهش چرخش سرشمع گروه شمع می باشد. برای گروه شمع با طول مدفون 20 متر و فواصل شمع 3 تا 5 برابر قطر شمع، ضریب RF گروه شمع پس تزریق شده در مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح به ترتیب در محدوده $0/92$ - $0/85$ و $0/89$ - $0/81$ می باشد.

5- مراجع

- Abedi AS, Hataf N, "Bearing capacity of strip footings located on grouted soil slopes", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 19 (Z4), 16827-16837.
- Bo Z, Weijie N, Huabin W, Zhifeng L, "Research on bearing capacity of post-grouting pile groups as bridge foundations in karst areas", *The International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, 2011, 6115-6120.
- Bolognesi AJL, Moretto O, "Stage grouting preloading of large piles on sand", 8th ICSME, Moscow, 1978.
- Brown DA, Dapp SD, Thompson WR, Lazarte CA, "Design and construction of continuous flight auger piles", Washington, Federal Highway Administration, 2007, 33-35.

- Salem T, El-Basset, OH, Hassan R, "3D Numerical Analysis of Post-Grouted Piles", *Indian Geotechnical Journal*, 2024 54 (4), 1562-1583.
<http://dx.doi.org/10.1007/s40098-023-00832-2>
- Selby AR, "Ground vibrations caused by pile installation", *The 4th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Deep Foundation Institute, Stresa, 1991, Italy.
- Shalabi FI, Saleem MU, Qureshi HJ, Arifuzzaman M, Khan K, Rahman MM, "3D FE analysis of bored pile-pile cap interaction in sandy soils under axial compression-parametric study", *Journal of Engineering Research*, 2023, 11 (4), 301-313.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.011>
- Stocker M, "Influence of post-grouting on the load-bearing capacity of bored piles", *The Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1983, Balkema, Helsinki.
- Svinkin MR, "Mitigation of soil movements from pile driving", *Practice Periodical Structure Design Construction*, 2006, 11 (2), 80-85.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2006\)11:2\(80\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2006)11:2(80))
- Su S, Wang X, Lv S, "Experimental study on the bearing behaviour of super-long post-grouting cast-in-place pile in deep soft soil", *The 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2023, New Delhi.
<http://dx.doi.org/10.3233/ATDE230244>
- Tao H, Zhihui W, Guoliang D, Weiming G, Zheng Z, "Regression analysis and optimization for grouting pressure of post-grouting pile in saturated soil", *Journal of Southeast University/Dongnan Daxue Xuebao*, 2022, 52 (5).
<https://doi.org/10.1010.3969/j.issn.1001-0505.2022.05.007>
- Thiyyakkandi S, McVay M, Bloomquist D, Lai P, "Experimental study, numerical modeling of and axial prediction approach to base grouted drilled shafts in cohesionless soil", *Acta Geotechnica*, 2014, 9, 439-454.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11440-013-0246-3>
- Thiyyakkandi S, "Post-grouted deep foundations: individual and group responses", *Indian Geotechnical Journal*, 2024, 54 (1), 301-314.
<http://dx.doi.org/10.1007/s40098-023-00739-y>
- Tolooiyan A, Gavin K, "The base resistance of non-displacement piles in sand. Part II: finite-element analyses", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2013, 166 (6), 549-560. <https://doi.org/10.1680/geng.11.00101>
- Wan Z, Liu H, Zhou F, Dai G, "Axial bearing mechanism of post-grouted piles in calcareous sand", *Applied Sciences*, 2022, 12 (5), 2731.
<https://doi.org/10.3390/app12052731>
- Wan ZH, Dai GL, Gong WM, "Study on the response of postside-grouted piles subjected to lateral loading in calcareous sand", *Acta Geotechnica*, 2022, 17 (7), 3099-3115. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01392-6>
- Wan ZH, Qi K, Hu T, Guo ZL, Zhou F, Dai GL, "Experimental study on the durability of cement-stabilized soil for post-grouted piles in calcareous sand under marine environment", *Marine under the effect of combined loading*", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2023, 11 (3).
<https://doi.org/10.22065/jsce.2023.402512.3146>
- Mahboubi Niazmandi M, Mirasi S, Hashemi Jokar M, Momeni M, "The effect of combined loading on the bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soils adjacent to geogrid-reinforced slopes", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2023, 55 (9), 1825-1844.
<https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21741.7812>
- McVay M, Thiyyakkandi S, Joiner J, Adams V, "Group efficiencies of grout-tipped drilled shafts and jet-grouted piles (No. UF Project 73980/74027)", *University of Florida. Department of Civil and Coastal Engineering*, 2010.
- Ma H, Ma Y, Yao W, Chen C, "Research on bearing capacity of post-grouting super-long bored pile", In: *Earth And Environmental Science*, Bristol, IOP Publishing, 2021, 634 (1), 012111.
<http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/634/1/012111>
- Meyerhof GG, "Bearing capacity and settlement of pile foundations", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102 (3), 197-228.
- Mohammad Alinejad R, Bayat M, "Bearing capacity of post grouted drilled pile near a sandy slope", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2025.
<https://doi.org/10.22065/jsce.2025.484828.3551>
- Mohammad Alinejad R, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS, "Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading", *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14, 1-12.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-09123-7>
- Mohammad Alinejad RM, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS, "Experimental study of axially loaded pile group near a sloping ground", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2023, 67 (2), 382-391.
<https://doi.org/10.3311/PPci.18334>
- Mohammad Alinejad R, Bayat M, "Investigating the behavior of single pile and adjacent pile group of sandy slope under uplift loading", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024.
<https://doi.org/10.22034/ceej.2024.61105.2343>
- Mohammad-Alinejad R, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS, "Effect of degree of freedom of movement on the bearing capacity and efficiency coefficient of pile group adjacent to sandy slope", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2023, 10 (1), 95-113.
<https://doi.org/10.22065/jsce.2022.321897.2678>
- Nguyen TD, Lai VQ, Phung DL, Duong, TP, "Shaft resistance of shaft-grouted bored piles and barrettes recently constructed in Ho Chi Minh city", *Geotech Engineering Journal SEAGS AGSSEA*, 2019, 50 (3), 155-162.
- O'Neill MW, "Review of augured pile practice outside the United States", *Washington, Transportation Research Board*, 1994, 3-9.
- O'Neill MW, Reese LC, "Drilled shafts: Construction procedures and design methods", *Washington, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, 1999, 243-251.

- Zhou Z, Xu F, Lei J, Bai Y, Chen C, Xu T, Liu T, "Experimental study of the influence of different hole-forming methods on the bearing characteristics of post-grouting pile in Loess Areas", *Transportation Geotechnics*, 2021, 27, 100423. <http://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100423>
- Zhou Z, Wang K, Feng H, Tian Y, Zhu S, "Centrifugal model test of post-grouting pile group in loess area", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 151, 106985.
- Georesources and Geotechnology, 2024, 1-18. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2024.2434055>
- Wang W, Dai G, Wei J, Rahimi A, Zhai Q, "Effect of base grouting on the bearing capacity of bored piles", *Sustainability*, 2023, 15 (5), 4148. <https://doi.org/10.3390/su15054148>
- Wang Z, Huang L, Dai G, Li F, Ma T, "Experimental study on grouting effect of combined post-grouting piles in cohesive soil", *Journal of Testing and Evaluation*, 2024, 52 (1). <http://dx.doi.org/10.1520/JTE20230341>
- Wang J, Jin T, Qin W, Zhang F, "Performance evaluation of post-grouting for bored piles installed in inhomogeneous gravel pebble stratum overlaid by deep and soft soil", *layers. Geomechanics and Geoengineering*, 2024, 19 (1), 77-95. <https://doi.org/10.1080/17486025.2023.2181406>
- Woods RD, "Dynamic effects of pile installations on adjacent structures", Washington, Washington, Transportation Research Board, 1997, 11-18.
- Wu Y, Deng Y, Zhang X, Zhao C, Zhao C, "Modeling of grout returned height for postgrouting at pile tip considering the soil unloading and time-dependent behavior of cement viscosity effects", *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23 (8), 04023127. <https://doi.org/10.1061/IJGNAL.GMENG-8438>
- Wu Y, Zhang X, Zhao C, Zhao C, "Effects of soil unloading and grouting on the vertical bearing mechanism for compressive piles", *Ocean Engineering*, 2023, 271, 113754. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113754>
- Wu Y, Deng Y, Zhang X, Liu L, Zhao C, Zhang J, "Grout diffusion mechanism along the pile shaft during the process of pile tip post-grouting in sand", *Applied Sciences*, 2023, 14 (13), 5389. <https://doi.org/10.3390/app14135389>
- Xiang B, Zhang LM, Zhou LR, He YY, Zhu L, "Field lateral load tests on slope-stabilization grouted pipe pile groups", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141 (4), 04014124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001220)
- Ye JL, Chen SC, Wu XH, Wang Q, Chen RR, Bao LQ, "Pile group effect for base postgrouting", *Struct Engineering*, 2014, 30 (4), 94-98. <https://doi.org/10.15935/j.cnki>
- Youn H, Tonon F, "Numerical analysis on post-grouted drilled shafts: a case study at the Brazo River Bridge, TX", *Comput Geotech*, 2014, 37, 456-465. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.01.005>
- Zhang J, Zhao C, Zhao C, Wu Y, "Field test on application of tip grouting in enlarged head cast-in-place bored pile. In: *Earth and Environmental Science*", IOP Publishing, 2024, 1336, 1, 012041. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1336/1/012041>
- Zheng A, "Finite element analysis on bearing capacity of post-grouting bored pile with the HS-small model and the HS model", *The International Conference on Civil and Hydraulic Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/189/2/022087>