

Numerical investigation of tunnel excavation effects on single pile

Akram Esfandiari¹ , Shaida Shakeri²

1. Corresponding Author, Department of Architecture and Urban Planning, National University of Skills, Tehran, Iran.

E-mail: esfandiari.akram@yahoo.com

2. Department of Architecture and Urban Planning, National University of Skills, Tehran, Iran. E-mail:

Sheidashakeri25@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

2024-10-04

Received in revised form

2024-11-18

Accepted

2024-12-20

Available online

2024-12-30

Keywords:

Pile,
tunnel excavation,
numerical modeling,
shear transfer mechanism

ABSTRACT

In this article, the effects of tunnel excavation on the behavior of preloaded piles above the tunnel are examined. The analyses were conducted using the finite difference method (FDM) with the FLAC 3D software. A 20-meter pile located one meter above an 8-meter diameter tunnel was studied. Several important parameters, such as ground surface settlement in a free-field condition (without the presence of the pile), pile settlement, variations in axial force along the pile, and the mechanism of shear stress transfer at the pile-soil interface due to tunnel excavation, were investigated. The relative displacement created between the pile and the soil at the pile-soil interface due to tunnel advancement leads to changes in the distribution of axial forces and shear stresses at the interface. As the tunnel advances, the axial force along the pile decreases, and the shear stresses at the interface become active in most of the pile length, preventing further settlement of the pile. It has been determined that existing solutions may not accurately estimate the behavior of the pile, as several key issues have not been included. Due to the change in relative shear displacement between the pile and the soil alongside the pile with tunnel advancement, shear stresses and the distribution of axial forces along the pile change significantly. Downward shear stress is generated at the upper part of the pile, while upward shear stress is mobilized at the lower part of the pile, resulting in compressive forces acting on the pile. Most of the axial force on the pile in the transverse direction (behind and in front of the piles) has developed within $\pm 2D$, where D is the tunnel diameter. Additionally, the mobilization of shear resistance at the pile-soil interface has been identified as a key factor governing the pile-soil-tunnel interaction. The reduction in the apparent allowable capacity of the pile due to tunnel excavation depends on the position of the pile relative to the tunnel position.

Cite this article: Esfandiari, Akram., & Shakeri, Shaida. (2024). Numerical investigation of tunnel excavation effects on single pile. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(2), 188-202. DOI: 10.22126/amcen.2025.11330.1026



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.11330.1026

Publisher: Razi University

Introduction

In recent years, tunnel construction in urban areas with different uses has been increasing. The construction of these tunnels under or near preloaded piles is inevitable. The excavation of these tunnels affects the behavior of the piles due to ground deformation. This ground deformation causes pile settlement and changes in axial force along the pile. Many studies have been conducted on the behavior of piles located in the vicinity of tunnels. Some of these studies have investigated the behavior of piles located in the vicinity of tunnels in the field. [1-7] Similarly, studies on the behavior of piles located in the vicinity of tunnels have been investigated using centrifuge tests in the laboratory [7-16]. In general, changes in axial force (drag or tensile force) and pile movement (lateral settlement or deformation) have been reported from these studies. Studies on the behavior of piles under tunneling are limited, but in recent years some of these studies have been reported, including: studies by Selmatas [5], Lee [17] and Durant et al. [18]. These studies have shown that when the tunnel is under the piles, the behavior of the pile is more affected by the tunnel than when the tunnel passes near the pile. Selmatas [5] reported from the results of detailed and complete field studies that the behavior of the pile in response to tunneling in Clay (London) when the tunnel is under the piles, there are severe changes in the distribution of axial force and also the settlement of the pile head relative to the settlement of the ground surface due to tunnel excavation. Also, Durant and Williamson [18] used two experimental methods (2/3 depth method and neutral axis method) to estimate the settlement of the pile head using the settlement The free boundary profile and the axial force distribution have been reported. In the 2/3 depth method, it is assumed that the settlement of the pile head is similar to the settlement of the soil profile at a depth of $2/3L$ as tunneling progresses. Here, L is the length of the pile. In addition, in the neutral axis method, it is assumed that the free boundary settlement at the neutral axis, where the axial force changes from compression to tension, is similar to the settlement of the pile head as tunneling progresses. In this paper, the behavior of individual piles under which a tunnel is being excavated in the soil is investigated. The behavior of these piles is investigated by a series of three-dimensional finite difference analyses.

Method

In this paper, Flac 3D software (Itasca Consulting Group, 2015) [19] has been used for numerical modeling. Figure (1) shows the 3D finite difference mesh model used in numerical analysis. Due to the symmetry of the model, only half of the entire model has been simulated. A total of 32272 zones and 35416 nodes have been created in the finite difference mesh. The boundary conditions at the bottom are hinged and at the sides are roller. The dimensions of the model have been chosen in a way to prevent the adverse effect of boundary conditions on the obtained results. The cross-sectional area of the square pile is assumed to be 0.5×0.5 m and the length (L) of the pile is 20 m. The diameter of the tunnel (D) is 8 m and the distance of the tunnel center from the ground surface is 25 m. Figure (2) shows the position of the

tunnel and the pile relative to each other. Also, the groundwater level at the ground surface and the modeling are assumed to be undrained.

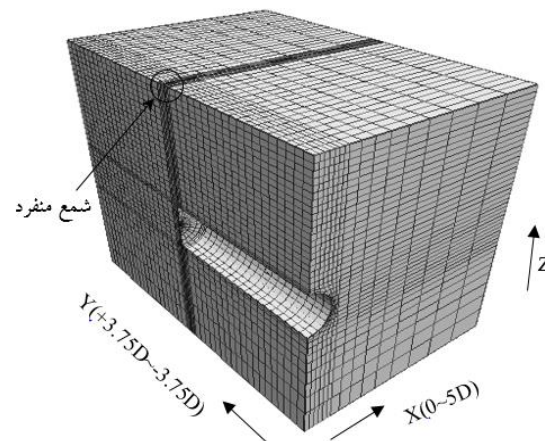


Figure (1). Three-dimensional finite difference mesh model (tunnel surface at $Y/D=0$, D = tunnel diameter)

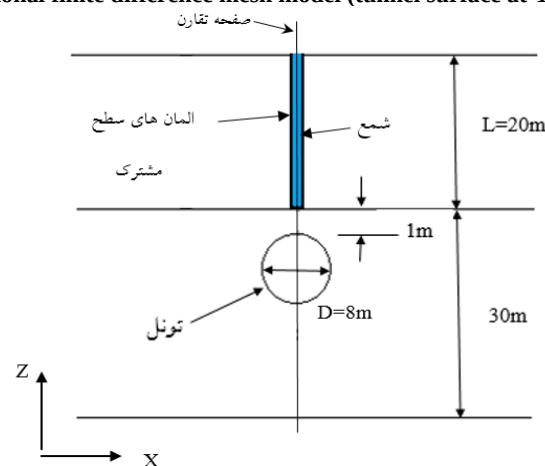


Figure (2). Pile and tunnel position relative to each other

Results and Conclusions

This study was conducted to investigate the behavior of preloaded piles in weathered soil whose end position is higher than the tunnel crown. The results of this study are briefly mentioned below:

- 1- There are many changes in the axial force distribution due to tunnel excavation. So that the axial force is reduced and tensile force is created in the pile.
- 2- The axial capacity of the pile was reduced due to tunnel excavation so that the safety factor at the end of excavation was reduced to 0.97. This reduction in bearing capacity can cause problems for the structure in service.
- 3- The maximum tensile force created in the pile was 0.325Pa, which is approximately 0.14% of the tensile capacity of the pile (2000kN). Therefore, there is a possibility of tensile

cracks in the pile. The largest decrease in the axial force distribution was between the positions $Y/D=-1$ and $Y/D=1$, so that approximately 95% of the total changes in the net axial force are observed in this interval.

4- The pile settlement due to tunnel excavation was much larger than the pile settlement due to axial load. Also, the pile settlement due to tunnel excavation was calculated to be larger than the ground settlement in the free boundary condition.

5- The relative displacement at the top of the neutral plane is positive, which indicates a greater settlement of the pile than the soil. The relative displacement at the bottom of the neutral plane is negative, which indicates a greater settlement of the soil than the pile. The greatest change in relative displacement occurs when the tunnel surface is at the position $Y/D=-1$ to $Y/D=1$.

6- According to this research and the research of Lee [17] and Selmata [5], the shear stresses at the interface become negative at the bottom of the neutral plane (where the shear stress becomes zero) due to a greater settlement of the soil than the pile settlement, which causes the distribution of the axial tensile force in the pile and also increases the small elastic length of the pile. The greatest change in the distribution of shear stress at the interface occurs when the tunnel surface is at the position $Y/D=-1$ to $Y/D=1$.

7- The results obtained from this study may be dependent on the problem conditions, but they clearly show the shear transfer mechanism and behavior of the individual pile located at the top of the tunnel. The effects of the shear stiffness parameters K_s and normal stiffness K_n on the mechanical behavior of the pile at the pile-soil interface require detailed studies, because the slip at the interface, relative displacement, and shear transfer mechanism are dependent on these parameters. In addition, according to the results obtained, the greatest influence of the pile on the tunnel, such as axial force distribution, relative displacement, and shear stresses at the pile-soil interface, occurs when the tunnel surface is at the position $Y/D=-1$ to $Y/D=1$. Therefore, for preloaded piles that are excavated from below, precautions should be taken to minimize the influence of the pile on the tunnel excavation at this excavation position when the tunnel surface is at the position $Y/D=-1$ to $Y/D=1$.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی عددی اثرات حفاری تونل بر روی شمع منفرد

اکرم اسفندیاری^۱✉، شیدا شاکری^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: esfandiari.akram@yahoo.com

۲. گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: Sheidashakeri25@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰	
کلیدواژه‌ها: شمع، حفاری تونل، مدلسازی عددی، مکانیسم انتقال برش	در این مقاله به بررسی اثرات حفاری تونل بر روی رفتار شمع پیش بارگذاری شده در بالای تونل پرداخته شده است. در انجام آنالیزها از روش تفاضل محدود (FDM) با استفاده از نرم افزار 3D FLAC استفاده شده است. در این مقاله شمع ۲۰ متری در تراز یک متری بالای تونلی به قطر ۸ متری مورد مطالعه قرار گرفته است. چندین پارامتر مهم، مانند نشست سطح زمین در حالت مرز آزاد (بدون حضور شمع)، نشست شمع، تغییرات نیروی محوری در طول شمع و مکانیسم انتقال تنش برشی در سطح مشترک شمع و خاک در اثر حفاری تونل مورد مطالعه قرار گرفته است. با جابجایی نسبی ایجاد شده بین شمع و خاک در سطح مشترک شمع-خاک با پیشروی حفاری تونل، تغییر در توزیع نیروی محوری و تنش‌های برشی سطح مشترک ایجاد می شود بطوری که با پیشروی تونل، نیروی محوری در طول شمع کاهش می‌یابد و تنش‌های برشی سطح مشترک در بیشتر طول شمع طوری فعال می‌شود که از نشست بیشتر شمع جلوگیری کند. مشخص شده است که راه‌حل‌های موجود ممکن است رفتار شمع را به‌طور دقیق تخمین نزنند، زیرا چندین موضوع کلیدی گنجانده نشده‌اند. به دلیل تغییر در جابجایی برشی نسبی بین شمع و خاک در کنار شمع با پیشروی تونل، تنش‌های برشی و توزیع نیروی محوری در طول شمع به شدت تغییر می‌کند. تنش برشی رو به پایین در قسمت بالایی شمع ایجاد می‌شود، در حالی که تنش برشی رو به بالا در قسمت پایین شمع تحرک یافته و در نتیجه نیروی فشاری شمع ایجاد می‌شود. اکثر نیروی محوری روی شمع در جهت عرضی (پشت و جلوی شمع‌ها) نسبت به موقعیت شمع، که در آن D قطر تونل است، در $2D \pm$ توسعه یافته است. علاوه بر این، بسیج مقاومت برشی در فصل مشترک شمع-خاک به عنوان یک عامل کلیدی حاکم بر تعامل شمع-خاک-تونل زنی مشخص شد. کاهش ظرفیت مجاز ظاهری شمع به دلیل حفر تونل به محل شمع نسبت به موقعیت تونل بستگی دارد.

استناد: اسفندیاری، اکرم؛ شاکری، شیدا. (۱۴۰۳). بررسی عددی اثرات حفاری تونل بر روی شمع منفرد. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*،

DOI: 10.22126/amcen.2025.11330.1026 .۱۸۸-۲۰۲،(۳)۱



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

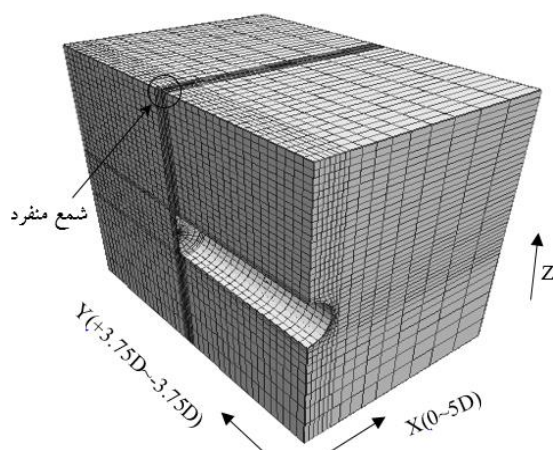
در سال‌های اخیر، ساخت تونل در نواحی شهری با کاربری‌های متفاوت رو به افزایش می‌باشد. ساخت این تونل‌ها در زیر یا مجاورت شمع‌های از پیش بارگذاری شده امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. حفاری این تونل‌ها رفتار شمع‌ها را در اثر تغییر شکل زمین تحت تاثیر قرار می‌دهد. این تغییر شکل زمین باعث نشست شمع و تغییرات نیروی محوری در طول شمع می‌شود. مطالعات زیادی بر روی رفتار شمع‌هایی که در مجاورت تونل قرار دارند انجام شده است. بعضی از این مطالعات به صورت میدانی به بررسی رفتار شمع‌هایی که در مجاورت تونل قرار داشته، پرداخته‌اند. [۷-۱] به طور مشابه مطالعاتی بر روی رفتار شمع‌هایی که در مجاورت تونل قرار دارند با استفاده از تست‌های سانتری فیوژ در آزمایشگاه مورد بررسی قرار داده‌اند [۷-۱۶]. به طور کلی تغییرات نیروی محوری (نیروی درگ و یا نیروی کششی) و حرکت شمع (نشست یا تغییر شکل جانبی) از این مطالعات گزارش شده است. مطالعه بر روی رفتار شمع‌هایی که تونل‌سازی در زیر آن‌ها قرار دارد محدود هستند اما در سال‌های اخیر بعضی از این مطالعات شامل: مطالعات سلمتاس [۵]، لی [۱۷] و دورینت و همکاران [۱۸] گزارش شده است. این مطالعات نشان داده‌اند هنگامی که تونل در زیر شمع‌ها قرار دارد رفتار شمع بیشتر تحت تاثیر تونل می‌باشد نسبت به حالتی که تونل از مجاورت شمع می‌گذرد. سلمتاس [۵] از نتایج مطالعات میدانی دقیق و کامل گزارش کرده که رفتار شمع در پاسخ به تونل‌سازی در رس (لندن) هنگامی که تونل در زیر شمع واقع است، تغییرات شدیدی در توزیع نیروی محوری و همچنین نشست سرشمع نسبت به نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل رخ می‌دهد. همچنین دورینت و ویلیامسون [۱۸] دو روش تجربی (روش 2/3 عمق و روش محورخنی) در تخمین نشست سرشمع با استفاده از نشست پروفیل مرز آزاد و همچنین توزیع نیروی محوری گزارش کرده‌اند. در روش 2/3 عمق، فرض می‌شود که با پیشرفت تونل‌سازی نشست سرشمع شبیه به نشست پروفیل خاک در عمق $2/3L$ می‌باشد. در اینجا L طول شمع می‌باشد. به علاوه در روش محورخنی، فرض می‌شود که نشست مرز آزاد در محورخنی، جایی که نیروی محوری از فشاری به کششی تغییر می‌کند، شبیه به نشست سرشمع با پیشرفت تونل‌سازی است. در این مقاله، به

بررسی رفتار شمع‌های منفردی که تونل از زیر آن‌ها در حال حفاری در خاک است پرداخته شده است. رفتار این شمع‌ها با یک سری از آنالیزهای تفاضل محدود سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مدل‌سازی عددی

۲-۱. مدل تفاضل محدود و شرایط مرزی

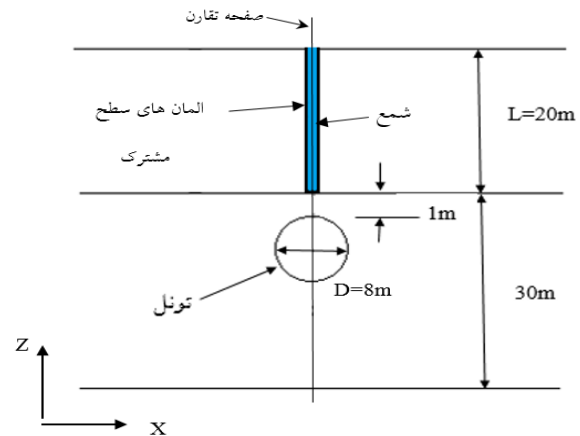
در این مقاله برای انجام مدل‌سازی عددی از نرم افزار Flac 3D (Itasca Consulting Group, 2015) [۱۹] استفاده شده است. شکل (۱) مدل شبکه‌بندی تفاضل محدود سه بعدی مورد استفاده در آنالیزهای عددی را نشان می‌دهد. به دلیل متقارن بودن مدل، تنها نیمی از کل مدل شبیه‌سازی شده است. در مجموع ۳۲۲۷۲ زون و ۳۵۴۱۶ گره در شبکه تفاضل محدود ایجاد شده است. شرایط مرزی در کف به صورت مفصلی و در کناره‌ها به صورت غلطکی می‌باشد. ابعاد مدل به نحوی انتخاب شده تا از تاثیر نامطلوب شرایط مرزی بر نتایج بدست آمده جلوگیری شود. سطح مقطع شمع مربع شکل به ابعاد (d) 0.5×0.5 متر و طول (L) شمع ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. قطر تونل (D) ۸ متر و فاصله مرکز تونل از سطح زمین ۲۵ متر است. شکل (۲) موقعیت تونل و شمع را نسبت به هم نشان می‌دهد. همچنین سطح آب زیرزمینی در سطح زمین و مدل‌سازی به صورت زهکشی نشده فرض شده است.



شکل (۱). مدل شبکه بندی تفاضل محدود سه بعدی (سطح تونل در $D = Y/D = 0$ ، قطر تونل)

۲-۲. ساختار مدل ها و مشخصات مصالح

برای مدل سازی رفتار تونل از آنالیزهای الاستو-پلاستیک استفاده شده است. برای مدل سازی اندرکنش بین شمع و خاک از المان های سطح مشترک استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات مصالح استفاده شده در آنالیزها که براساس مقاله لی [۲۰] انتخاب شده آمده است.



شکل (۲). موقعیت شمع و تونل نسبت به هم

جدول (۱). مشخصات مصالح

مصالح	مدل	K_0	ν'	$E(\text{MPa})$	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$C'(\text{kPa})$	$\phi'(^{\circ})$
خاک	موهر-کلمب	0.5	0.25	50	20	10	35
شمع	الاستیک	-	0.2	30,000	25	-	-
لاینینگ	الاستیک	-	0.2	15,000	25	-	-

۳. نتایج بدست آمده از آنالیزها

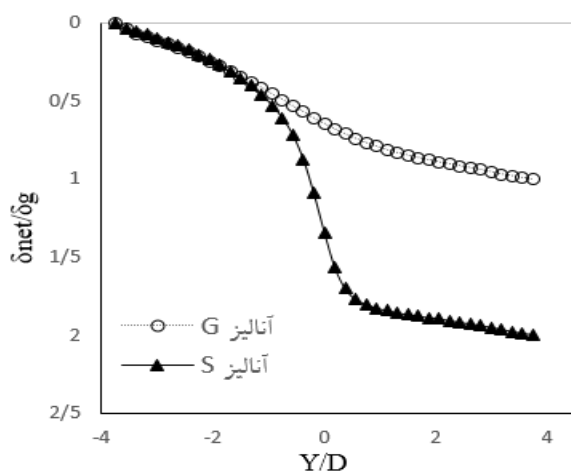
۳-۱. تعیین ظرفیت باربری شمع (آنالیز L)

شکل ۳ رابطه بین روی محوری شمع و نشست سرشمع را نشان می دهد. این آنالیز با شرایط مرزی مدل اصلی که در شکل ۱ نشان داده شده جهت محاسبه ظرفیت باربری محوری شمع انجام شده است. در تحلیل، حفاری تونل در نظر گرفته نشده است. در این روش ابتدا یک بار به سرشمع اعمال شده و مقدار آن از صفر بتدریج افزایش می یابد. در انتهای آنالیز نمودار نیرو- جابه جایی سرشمع همان طور که در شکل ۳ دیده می شود رسم شده است. با توجه به نمودار دیده می شود از ابتدای بارگذاری تا بار ۱۶۰۰ kN، نمودار به صورت خطی تغییر می کند و بعد از آن با افزایش اندک در مقدار نیرو، جابه جایی های بزرگی ایجاد می شود. برای تعیین ظرفیت باربری شمع از روش داویسون [۲۲] استفاده شده است. در این روش با رسم یک خط موازی خط الاستیک فشاری ظرفیت نهایی شمع بدست می آید. ظرفیت نهایی بدست آمده در این آنالیز kN

المان های سطح مشترک به وسیله سختی نرمال (K_n)، سختی برشی (K_s)، چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح مشترک شمع- خاک براساس معیار کلمب تعریف شده اند. براساس مطالعات پارامتری و مطالعات قبلی (چن و مارتین [۲۱]) مقدار $K_s=100\text{MPa/m}$ و مقدار $K_n=100\text{MPa/m}$ در آنالیزها استفاده شده است.

۳-۲. روش مدلسازی عددی

مدل سازی عددی شامل سه مرحله می باشد، مرحله به تعادل رساندن مدل، اعمال بار محوری به شمع و حفاری تونل از $-3.75D$ تا $+3.75D$ در جهت Y (شکل ۱) (-30 متر تا $+30$ متر) مدل سازی شده است. بدنبال به تعادل رساندن مدل، بار محوری ۸۴۰ kN (به دست آمده از آنالیز L) به سرشمع اعمال شده است. سپس حفاری تونل در ۴۰ مرحله انجام شده که در هر مرحله، ۱.۵ متر حفاری انجام و بعد از آن لاینینگ گذاری به ضخامت ۰.۲ متر اجرا شده است.



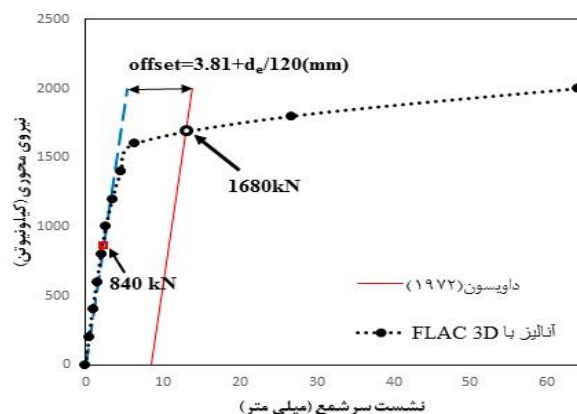
شکل (۴ الف). تغییرات نشست نرمالیزه سرشمع و نشست زمین

حداکثر نشست سرشمع تقریباً دو برابر حالت مرز آزاد می باشد. در انتهای حفاری تونل، δ_{net}/δ_g برای شمع ۱/۹۹۵ بدست آمده است. δ_{net} برای آنالیز S، ۱۹.۶۹ میلی متر بدست آمده است. حداکثر میزان نشست در فاصله $Y/D = -1.3$ تا $Y/D = 0.75$ برای آنالیز G و آنالیز S بدست آمده است.

شکل (۴ ب) نشست خالص نرمالیزه شده δ_{net}/δ_g در طول شمع (آنالیز S) و در موقعیت محور مرکزی شمع در حالت مرز آزاد (آنالیز G) را در انتهای حفاری تونل ($Y/D = 3.75$) نشان می دهد. با توجه به شکل (۴ ب) δ_{net}/δ_g در حالت مرز با عمق افزایش می یابد که از $Z/L = 0.65-1$ افزایش بیشتری دیده می شود. برای شمع، δ_{net}/δ_g از $Z/L = 0.8-1$ مقدار بسیار کمی افزایش می یابد که نشان می دهد شمع در این ناحیه افزایش طول داشته که ناشی از نیروی محوری کششی ایجاد شده در شمع در این ناحیه بوده که علت ایجاد این نیروی کششی اصطکاک جدار منفی ایجاد شده در سطح مشترک شمع و خاک در اثر حفاری تونل می باشد.

حداکثر نشست شمع (با در نظر گرفتن اعمال بار محوری) ۲۲/۲۵ میلی متر بدست آمده است. بنابراین، براساس نتایج محققین لی و ان جی نیروی متناظر نشست نهایی با توجه به شکل (۳)، ۱۷۳۰ kN بدست آمده است. [۲۳] مقدار ضریب اطمینان بشدت کاهش یافته است. ($F.S = 1680/1730 = 0.97$). بنابراین می توان گفت در اثر

۱۶۸۰ می باشد. سپس با استفاده از ضریب اطمینان ۲ ظرفیت باربری مجاز شمع محاسبه می شود. ظرفیت باربری مجاز (P_a) با توجه به ضریب اطمینان لحاظ شده ۸۴۰ kN محاسبه شده است. مقدار نشست سرشمع (δ_p) در این آنالیز ۲.۵۵ میلی متر بدست آمده است.



شکل (۳). رابطه نیروی محوری با نشست سرشمع

در شکل (۳)، $d_e = 2 \times d / \sqrt{\pi}$ قطر معادل شمع دایره ای است که در تعیین ظرفیت باربری مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۳. نشست شمع و سطح زمین

شکل (۴ الف) تغییرات نشست نرمالیزه سرشمع (آنالیز S) و نشست زمین (آنالیز G) δ_{net}/δ_g را برای تمام مراحل حفاری ($Y/D = -3.75$ تا 3.75) نشان می دهد. δ_{net} نشست خالص سر شمع (بدون در نظر گرفتن نشست ناشی از اعمال بار محوری) و سطح زمین در هر مرحله در اثر حفاری تونل می باشد و δ_g حداکثر نشست سطح زمین ($\delta_g = 9.87 \text{ mm}$) در حالت مرز آزاد در قسمتی که شمع قرار می گیرد، می باشد.

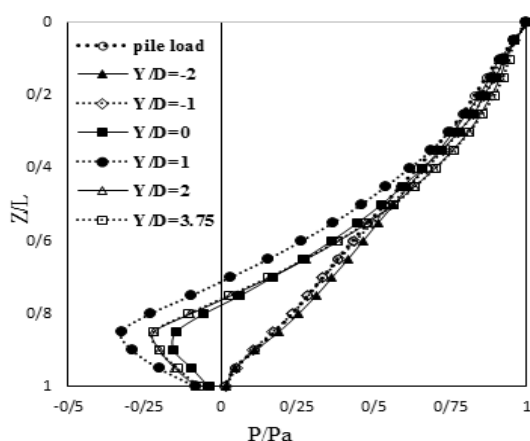
نشست عرضی سطح زمین در حالت مرز آزاد شبیه به منحنی گوس بدست آمده از رابطه زیر می‌باشد.

$$S = S_{\max} \times \exp(-0.5(x/i)^2) \quad (1)$$

$S_{\max}$ حداکثر نشست سطح زمین، X فاصله از محور قائم تونل در جهت عرضی و i فاصله نقطه عطف منحنی از محور قائم تونل می‌باشد. مقدار i بدست آمده با توجه به برازش مناسب ترین منحنی گوس ۱۵ متر بدست آمده است. پارامتر K نیز با توجه به مقدار i و عمق تونل ($i=K/Z_C$ ، Z_C فاصله قائم مرکز تونل از سطح زمین) ۰.۶ محاسبه شده است. افت حجمی ایجاد شده در انتهای آنالیز G و S ، ۰.۷۳٪ و ۰.۷۴٪ به ترتیب بدست آمده است. افت حجمی بدست آمده برای شمع منفرد (آنالیز S) خیلی نزدیک به حالت مرز آزاد (آنالیز G) بدست آمده است چرا که بارگذاری شمع قبل از حفاری تونل فقط بر خاک اطراف شمع اثر می‌گذارد. این مقادیر با مقادیر آنالیزهای اروپایی (۰.۵-۲٪) برای خاک های رسی و خاک ماسه ای گزارش شده توسط میر و تیلر [۲۴]، باگر و همکاران [۲۵]، چاپمن و همکاران [۲۶] همخوانی خوبی دارد.

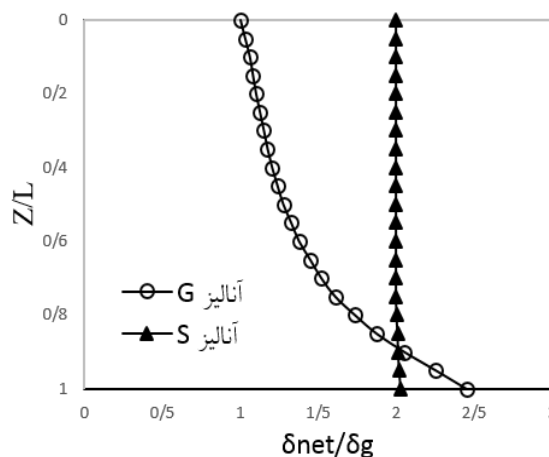
۳-۴. نیروی محوری شمع (آنالیز S)

شکل ۶ الف) توزیع نیروی محوری شمع (نرمالیزه شده (P/P_a)) با عمق نرمالیزه شده (Z/L) در مراحل مختلف حفاری نشان می‌دهد. در اینجا P نیروی محوری در عمق مورد نظر، P_a نیروی محوری اعمال شده به شمع قبل از حفاری تونل، Z عمق مورد نظر و L طول شمع می‌باشد.



شکل ۶ الف). توزیع نیروی محوری شمع (نرمالیزه شده با عمق نرمالیزه شده

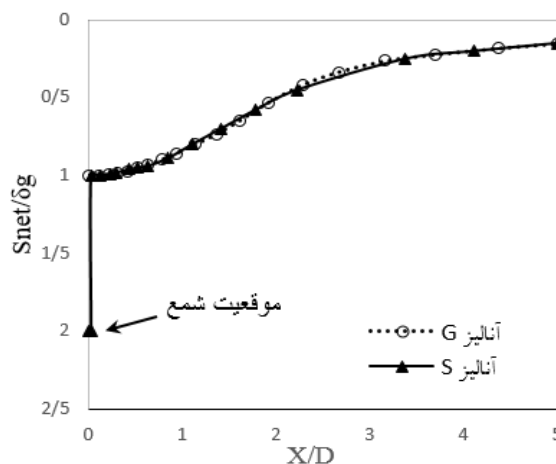
حفاری تونل ظرفیت باربری شمع کاهش می‌یابد که این کاهش در اثر حفاری توسط لی و ان جیو سلمتاس آورده شده است [۵ و ۲۳].



شکل ۶ ب). نشست خالص نرمالیزه شده

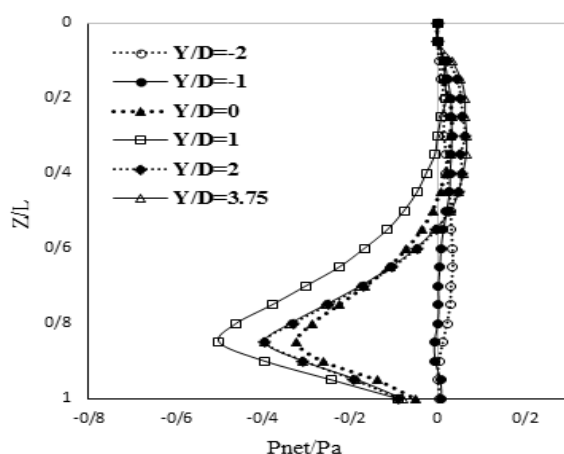
۳-۳. نشست عرضی سطح زمین (آنالیز G و S)

شکل ۵) نشست نرمالیزه سطح زمین $S_{\text{net}}/\delta g$ ، در جهت عرضی (جهت X در شکل ۱) در انتهای آنالیزهای G و S نشان می‌دهد. S_{net} نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل می‌باشد. نشست‌ها در مرحله اعمال بار محوری در آنالیز S ، صفر شده‌اند. بنابراین فقط ناشی از حفاری تونل در نظر گرفته شده است.



شکل ۵). نشست عرضی نرمالیزه سطح زمین

شبهه به مشاهدات گزارش شده به وسیله سلمتاس [۵] و لی [۱۷] می باشد. علت این افزایش مجدد در توزیع نیروی محوری اجرای لاینینگ تونل در موقعیت نزدیک شمع و افزایش سختی محیط اطراف در اثر اجرای لاینینگ می باشد.



شکل (۶ب). توزیع نیروی محوری خالص با عمق نرمالیزه شده

۳-۵. جابجایی نسبی بین شمع و خاک (آنالیز S)

شکل (۷الف) جابجایی نسبی بین شمع و خاک را در سطح مشترک شمع- خاک با عمق نرمالیزه شده در مراحل مختلف حفاری نشان می دهد. قبل از حفاری تونل در اثر اعمال بار محوری به شمع جابجایی نسبی در طول کل شمع مثبت می باشد که نشان دهنده بسیج شدن اصطکاک جدار مثبت می باشد. اما با پیشرفت عملیات حفاری، در جابجایی نسبی تغییرات اساسی دیده می شود. از سر شمع تا صفحه خنثی، (جایی که جابجایی نسبی بین شمع و خاک صفر است) جابجایی نسبی مثبت مشاهده می شود که نشان می دهد نشست شمع بزرگتر از خاک اطراف آن می باشد. اما در زیر صفحه خنثی جابجایی منفی ایجاد شده نشان دهنده نشست بیشتر خاک نسبت به شمع می باشد که این عامل باعث ایجاد اصطکاک جدار منفی در قسمت پایینی شمع و ایجاد توزیع نیروی کششی در شمع می شود. موقعیت صفحه خنثی تقریباً در $Z/L=0.85$ می باشد.

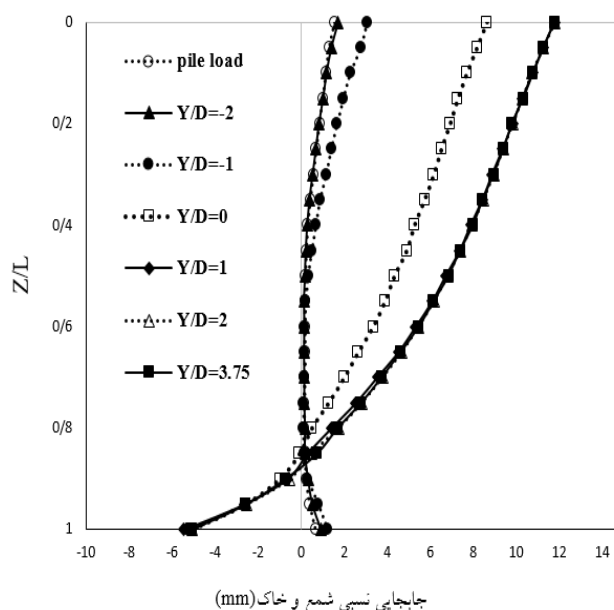
قبل از حفاری تونل، نیروی محوری در طول شمع با افزایش عمق به تدریج کاهش می یابد بطوری که این کاهش ناشی از اصطکاک جدار مثبت در طول شمع و در سطح مشترک شمع-خاک می باشد. تقریباً ۹۹٪ نیروی محوری توسط اصطکاک جداره و تنها ۱٪ توسط مقاومت انتهای شمع تحمل می شود. با شروع حفاری، در ابتدا مقدار کمی افزایش نیروی محوری در طول شمع تا مرحله $Y/D=-2$ محاسبه شده است که علت این افزایش اندک، کاهش مقاومت جداره ای در طول شمع می باشد. این یافته شبهه به مطالعات انجام شده توسط لی و ان جی [۲۳]، سلمتاس [۵]، لی و همکاران [۲۷] و لی [۱۷] می باشد. با ادامه حفاری تونل نیروی محوری در شمع به تدریج با عمق کاهش می یابد. هنگامی که سطح تونل در موقعیت $Y/D=0$ قرار دارد نیروی محوری شمع در قسمت پایین شمع به زیر صفر کاهش می یابد که این مقادیر منفی نشان دهنده ایجاد نیروی کششی در قسمت پایینی شمع می باشد. بطوری که این کاهش در نیروی محوری و ایجاد نیروی کششی در شمع توسط دورینت و ویلیامسون [۱۸] گزارش شده است. موقعیت نقطه خنثی، جایی که نیروی محوری از فشاری به کششی تغییر می کند، در انتهای حفاری، $Z/L=0.8$ می باشد. ماکزیمم نیروی کششی ایجاد شده در شمع برابر 273 kN (0.325 Pa) محاسبه شده است که در موقعیت $Z/L=0.85$ می باشد، این مقدار نیروی کششی تقریباً برابر 0.14% ظرفیت کششی شمع (2000 kN) می باشد. بنابراین احتمال ایجاد ترک های کششی در شمع وجود دارد.

شکل (۶ب) توزیع خالص نرمالیزه شده نیروی محوری (P_{net}/P_a) را با عمق نرمالیزه شده نشان می دهد. P_{net} نیروی محوری خالص فقط در اثر حفاری تونل در طول می باشد. به عبارت دیگر، توزیع نیروی محوری در اثر اعمال بار محوری قبل از حفاری تونل صفر شده است. در ابتدا، افزایش اندکی در توزیع نیروی محوری در طول شمع تا $Y/D=-2$ مشاهده می شود. بعد از آن با پیشرفت حفاری نیروی محوری کاهش می یابد که این کاهش باعث ایجاد نیروی کششی در شمع می شود. بیشترین مقدار کاهش در توزیع نیروی محوری بین موقعیت $Y/D=-1$ تا $Y/D=1$ بوده، بطوری که تقریباً ۹۵٪ کل تغییرات نیروی محوری خالص در این بازه مشاهده می شود. بعد از حفاری تونل و گذشتن از موقعیت $Y/D=1$ نیروی محوری در شمع به تدریج افزایش می یابد که این افزایش مجدد

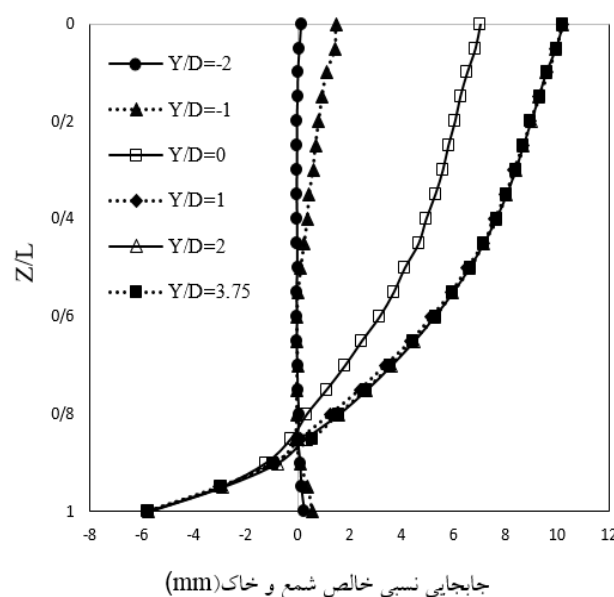
پیشرفت حفاری تغییرات زیادی در جابجایی نسبی ایجاد می‌شود. بیشترین میزان تغییر در جابجایی نسبی بین شمع و خاک زمانی ایجاد می‌شود که حفاری بین موقعیت $Y/D=-1$ تا $Y/D=+1$ باشد. بعد از گذشتن سطح تونل از موقعیت $Y/D=+1$ تغییرت جابجایی نسبی به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۷ب) دیده می‌شود که در قسمت بالای صفحه خنثی جابجایی نسبی مثبت بوده که همان طور که گفته شد نشان دهنده اصطکاک جدار مثبت در این قسمت می‌باشد در واقع از سرشمع تا صفحه خنثی تنش‌های برشی رو به بالا ایجاد شده که از نشست بیشتر شمع جلوگیری می‌کنند اما در قسمت زیر صفحه خنثی خاک نسبت به شمع نشست بیشتری داشته که باعث اصطکاک جدار منفی و تنش‌های برشی روبه پایین در سطح مشترک شمع-خاک می‌شود.

۳-۶. تنش برشی در سطح مشترک شمع-خاک (آنالیز s)

شکل (الف) تنش‌های برشی سطح مشترک در مراحل مختلف حفاری (مرحله بارگذاری، $Y/D=-2, -1, 0, 1, 2, 3, 75$) را با عمق نرمالیزه شده نشان می‌دهد. قبل از حفاری تونل، مقاومت اصطکاکی مثبت در طول کل شمع ایجاد شده است. با شروع حفاری تونل، تنش برشی به تدریج تا عمق $Z/L=0.775$ افزایش می‌یابد و از عمق $Z/L=0.775$ تا $Z/L=1$ به تدریج کاهش می‌یابد. تغییر تنش برشی از مثبت به منفی در عمق $Z/L=0.85$ اتفاق می‌افتد. این روند با جابجایی نسبی بین شمع و خاک سازگار می‌باشد بطوری که جابجایی نسبی از سرشمع تا عمق $Z/L=0.85$ مثبت بوده که این عامل نشان دهنده نشست بیشتر شمع نسبت به خاک اطراف می‌باشد که باعث ایجاد تنش‌های برشی مثبت می‌شود. به علاوه، از عمق $Z/L=0.85$ تا عمق $Z/L=1$ جابجایی نسبی منفی بوده که نشان دهنده نشست بیشتر خاک اطراف نسبت به شمع می‌باشد که باعث ایجاد تنش‌های برشی منفی در سطح مشترک شمع و خاک می‌باشد. عمق صفحه خنثی، جایی تنش برشی صفر است، $Z/L=0.85$ می‌باشد.

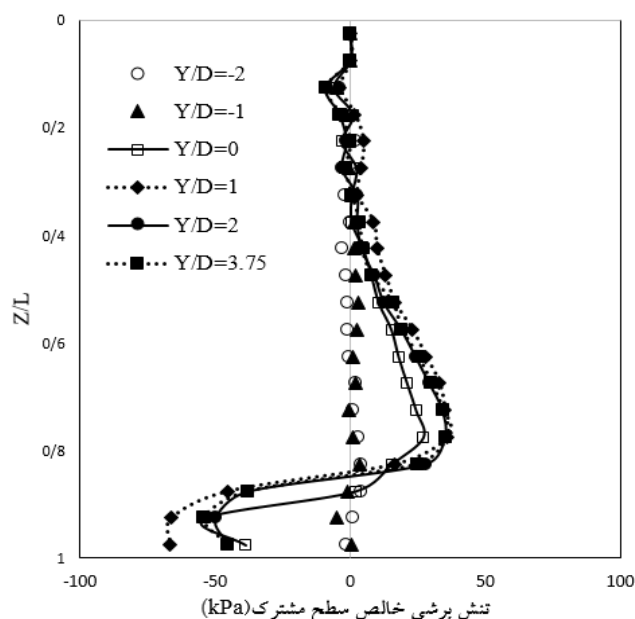


شکل (الف) جابجایی نسبی بین شمع و خاک

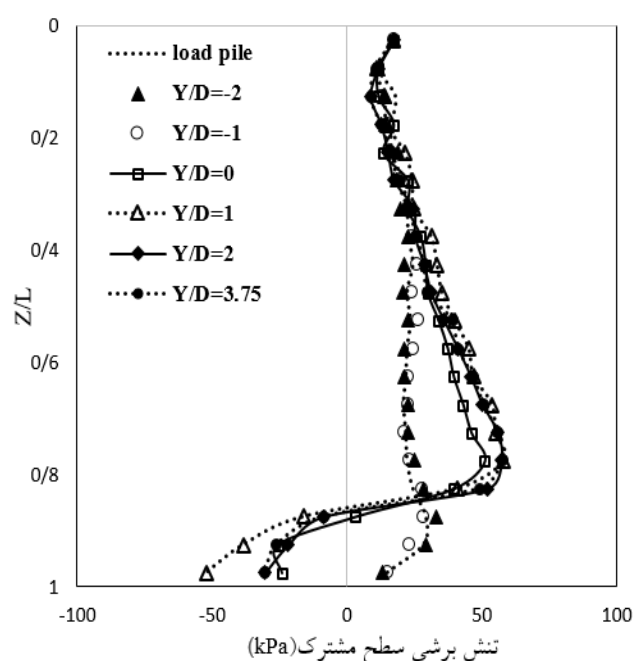


شکل (ب) جابجایی نسبی خالص بین شمع و خاک

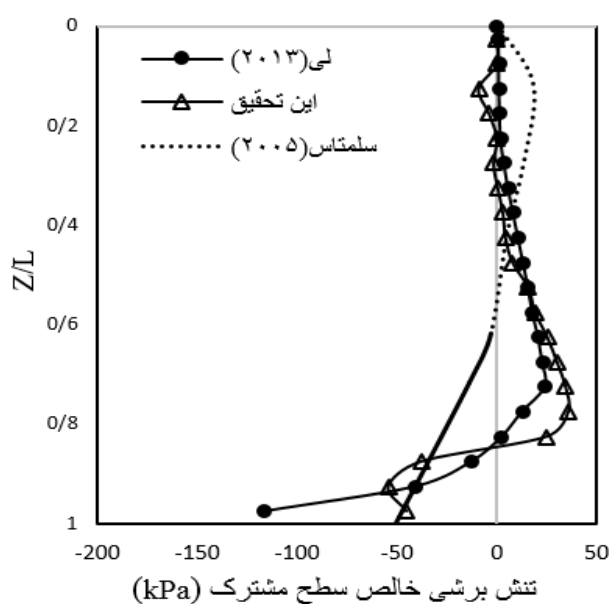
شکل (۷ب) توزیع خالص جابجایی نسبی را با عمق نرمالیزه شده نشان می‌دهد. به عبارت دیگر جابجایی نسبی در مرحله اعمال بار محوری صفر شده است. تغییرات کمی در جابجایی نسبی تا زمانی که موقعیت سطح تونل در $Y/D=-1$ می‌باشد دیده می‌شود. با



شکل (۸ب). توزیع تنش برشی خالص سطح مشترک



شکل (۸الف) توزیع تنش برشی در سطح مشترک شمع و خاک



شکل (۸ج) تنش برشی خالص سطح مشترک

۴. نتیجه گیری

این تحقیق به منظور بررسی رفتار شمع‌های پیش بارگذاری شده در خاک هوازده که موقعیت انتهایی آن‌ها بالاتر از تاج تونل

شکل (۸ب) تنش برشی خالص سطح مشترک فقط در اثر حفاری تونل با عمق نرمالیزه شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دیده می‌شود بیشترین تغییرات در تنش برشی سطح مشترک هنگامی ایجاد می‌شود که سطح تونل در فاصله $Y/D=-1$ تا $Y/D=+1$ باشد. این نتیجه با نتایج بدست آمده برای توزیع نیروی محوری و جابجایی نسبی بین شمع و خاک سازگار می‌باشد.

شکل (۸ج) توزیع تنش برشی خالص را در سطح مشترک شمع-خاک در مرحله آخر در این آنالیز با آنالیزی [۱۷] با عنوان پاسخ شمع به حفاری تونل در رس سخت و همچنین با نتایج میدانی بدست آمده از تحقیقات سلمتاس [۴] را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج توزیع تنش برشی خالص در هر سه تحقیق روند مشابهی را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود در قسمت پایینی شمع توزیع تنش برشی خالص به سمت پایین (اصطکاک جدار منفی) ایجاد شده است. در تحقیق سلمتاس [۴] توزیع تنش برشی منفی در شکل (۸ج) به صورت خط پر نشان داده شده است.

- قرار دارد انجام گردید. نتایج این تحقیق به طور مختصر در زیر ذکر می گردد:
- ۱- در توزیع نیروی محوری در اثر حفاری تونل تغییرات زیادی ایجاد می شود. به طوری که نیروی محوری کاهش یافته و نیروی کششی در شمع ایجاد می شود.
 - ۲- ظرفیت محوری شمع در اثر حفاری تونل کاهش یافت بطوری که ضریب اطمینان در پایان حفاری به 0.97 کاهش یافت. که این کاهش در ظرفیت باربری می تواند سازه را در سرویس دهی دچار مشکل کند.
 - ۳- حداکثر نیروی کششی ایجاد شده در شمع $0.325P_a$ بدست آمده که این مقدار نیروی کششی تقریباً برابر 0.14% ظرفیت کششی شمع (2000kN) می باشد. بنابراین احتمال ایجاد ترک های کششی در شمع وجود دارد. بیشترین مقدار کاهش در توزیع نیروی محوری بین موقعیت $Y/D=-1$ تا $Y/D=1$ بوده، بطوری که تقریباً 95% کل تغییرات نیروی محوری خالص در این بازه مشاهده می شود.
 - ۴- نشست سرشمع در اثر حفاری تونل خیلی بزرگتر از نشست سرشمع در اثر اعمال بار محوری بدست آمد. همچنین نشست سرشمع در اثر حفاری تونل بزرگتر از نشست زمین در حالت مرز آزاد محاسبه شد.
 - ۵- جابجایی نسبی در بالای صفحه خنثی مثبت بوده که نشان دهنده نشست بیشتر شمع نسبت به خاک می باشد. جابجایی نسبی در پایین صفحه خنثی منفی می باشد که نشان دهنده نشست بیشتر خاک نسبت به شمع می باشد. بیشترین میزان تغییر در جابجایی نسبی زمانی ایجاد می شود که سطح تونل در موقعیت $Y/D=-1$ تا $Y/D=1$ می باشد.
 - ۶- تنش های برشی در سطح مشترک با توجه به این تحقیق و تحقیقات لی [۱۷] و سلمتاس [۴] در پایین صفحه خنثی (جایی که تنش برشی صفر می شود) منفی می شود که در اثر نشست بیشتر خاک نسبت به نشست شمع می باشد که باعث توزیع نیروی محوری کششی در شمع و همچنین افزایش طول اندک الاستیک شمع می شود. بیشترین میزان تغییرات در توزیع تنش برشی سطح مشترک زمانی ایجاد می شود که سطح تونل در موقعیت $Y/D=-1$ تا $Y/D=1$ باشد.
- ۷- نتایج بدست آمده از این تحقیق ممکن است که به شرایط مسئله وابسته باشد، اما مکانیسم انتقال برش و رفتار شمع منفرد را که در بالای تونل قرار دارد به روشنی نشان می دهد. اثرات پارامترهای سختی برشی K_s و سختی نرمال K_n بر رفتار مکانیکی شمع در سطح مشترک شمع-خاک نیاز به مطالعات دقیق دارد، چرا که لغزش در سطح مشترک، جابجایی نسبی و مکانیسم انتقال برش وابسته به این پارامترها هستند. به علاوه، با توجه به نتایج بدست آمده بیشترین تاثیر پذیری شمع از تونل، از قبیل توزیع نیروی محوری، جابجایی نسبی و تنش های برشی در سطح مشترک شمع-خاک زمانی ایجاد می شود که سطح تونل در موقعیت $Y/D=-1$ تا $Y/D=1$ باشد. بنابراین برای شمع های پیش بارگذاری شده که عملیات حفاری تونل از زیر آنها انجام می شود بایستی تمهیداتی اتخاذ کرد تا وقتی سطح تونل در موقعیت $Y/D=-1$ تا $Y/D=1$ باشد تاثیرپذیری شمع از حفاری تونل در این موقعیت حفاری به حداقل برسد.
- ۸- مشخص شده است که راه حل های موجود ممکن است رفتار شمع را به طور دقیق تخمین نزنند، زیرا چندین موضوع کلیدی گنجانده نشده اند. به دلیل تغییر در جابجایی برشی نسبی بین شمع و خاک در کنار شمع با پیشروی تونل، تنش های برشی و توزیع نیروی محوری در طول شمع به شدت تغییر می کند. تنش برشی رو به پایین در قسمت بالایی شمع ایجاد می شود، در حالی که تنش برشی رو به بالا در قسمت پایین شمع تحرک یافته و در نتیجه نیروی فشاری روی شمع ایجاد می شود. اکثر نیروی محوری روی شمع در جهت عرضی (پشت و جلوی شمع ها) نسبت به موقعیت شمع، که در آن D قطر تونل است، در $\pm 2D$ توسعه یافته است. علاوه بر این، بسیج مقاومت برشی در فصل مشترک شمع-خاک به عنوان یک عامل کلیدی حاکم بر تعامل شمع-خاک-تونل زنی مشخص شد. کاهش ظرفیت مجاز ظاهری شمع به دلیل حفر تونل به محل شمع نسبت به موقعیت تونل بستگی دارد.

- [12] Lee YJ, Bassett RH. "Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis". Tunnell Undergr Space Technol 2007; 22:325-42.
- [13] Chiang GH. "The load transfer behavior of piles caused by nearby tunnelling". Master thesis. Taiwan: National Central University; 2002 [in Chinese].
- [14] Lee YJ. "Tunnelling adjacent to a row of loaded piles". PhD thesis, University College London, University of London; 2004.
- [15] Lee CJ, Chiang KH. "Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground". Can Geotech J 2007;44:1224-41.
- [16] Meguid MA, Mattar J. "Investigation of tunnel-soil-pile interaction in cohesive soils". J Geotech Geoenviron Eng, ASCE 2009;135(7):973-9.
- [17] C.J Lee. "Numerical analysis of pile response to open face tunnelling in stiff clay". Computers and Geotechnics 51 (2013) 116-127.
- [18] Devriendt M, Williamson M. Validation of methods for assessing tunnelling induced settlements on piles. Ground Eng; 2011 March, 25-30.
- [19] Reinhorn, A. M., Roh, H., Sivaselvan, M., Kunnath, S. K., Valles, R. E., Madan, A., ... & Park, Y. J. (2009). A Program for the Inelastic Damage Analysis of Structures.
- [20] C.J Lee. "Numerical analysis of the interface shear transfer mechanism of a single pile to tunnelling in weathered residual soil". computers and Geotechnics 42 (2012) 193-203.
- [21] Chen, C.Y., Martin, G.R., 2001. Effect of embankment slope on lateral response of piles. In: Billiaux et al. (Eds.), Flac and Numerical Modelling in Geomechanics. Swets & Zeitlinger, pp. 205-213.
- [22] Davisson MT. "High capacity piles, proceeding of lecture series in innovations in foundation construction". Illinois Section: ASCE; 1972. p. 81-112.
- [23] Lee GTK, Ng CWW. The effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile. J Geotech Geoenviron Eng ASCE 2005;131(2):193-201.
- [24] Mair, R.J., Taylor, R.N., 1997. Theme lecture: bored tunnels in the urban environment. In: Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Balkema, vol. 4, pp. 2353-2385.

References

- [1] Attewell PB, Yeates J, Selby AR. "Soil movements induced by tunnelling and their effects on-pipeline and structures". Blackie and Son Ltd.; 1986.
- [2] Coutts DR, Wang J. "Monitoring of reinforced concrete piles under lateral and vertical loads due to tunneling". Balkema, London: Tunnels and Underground Structures; 2000. p. 541-6.
- [3] Yong KY, Pang CH. Geotechnical challenges of the mass rapid transit (MRT) system in Singapore. In: Malaysian geotechnical conference, March 2004, Special Lecture; 2004.
- [4] Jacobsz SW. "Tunnelling effects on piled foundations". Tunnels and Tunnelling International; 2003, June, 28-31.
- [5] Selemetas D. "The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling". PhD thesis. University of Cambridge; 2005.
- [6] Kaalberg FJ, Teunissen EAH, van Tol AF, Bosch JW. "Dutch research on the impact of shield tunneling on pile foundations". Geotechnical aspects of underground construction in soft ground. In: Proceedings of 5th international conf of TC 28 of the ISSMGE; 2005. p. 123-33.
- [7] Pang CH. "The effects of tunnel construction on nearby pile foundation". PhD thesis, The National University of Singapore; 2006. p. 27-56.
- [8] Morton JD, King KH. "Effect of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundation". In: Proceedings of tunneling 79. London: Institution of Mining and Metallurgy; 1979. p. 57-68.
- [9] Bezuijen A, Schrier JVD. "The influence of a bored tunnel on pile foundations". In: Lee and Tan, editors. Centrifuge 94. Rotterdam: Balkema ;199 p. 681-6.
- [10] Loganathan N, Poulos HG, Stewart DP. "Centrifuge model testing of tunneling induced ground and pile deformations". Geotechnique 2000;50(3):283-94.
- [11] Ong OW, Leung CF, Yong KY, Chow YK. "Pile responses due to tunneling in clay. Physical modelling in geotechnics. In: 6th International conference on physical modelling in geotechnics. London": Taylor & Francis, Group; 2006. p. 1177-82.

- [25] Bakker, K.J., Bezuijen, A., 2008. Ten years of bored tunnels in the Netherlands. *Geotechniek* (April), 6–13.
- [26] Chapman, D., Metje, N., Stark, A., 2010. *Introduction to Tunnel Construction*. Spon Press.
- [27] Lee, S.W., Choy, C.K.M., Cheang, W.W.L., Swolfs, W., Brinkgreve, R., 2010. Modelling of tunnelling beneath a building supported by friction bored piles. The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference, pp. 215–218.