

## Evaluating the effect of Top heading and Central diaphragm wall methods on the surface settlement and pile group

Mehrad Mirsepahi<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Mirhosseini<sup>2\*</sup>, Arash Nayeri<sup>2</sup>, Seyed Hamid Lajevardi<sup>3</sup>

1- PhD candidate, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran  
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

### ABSTRACT

In urban areas with high population density, lack of surface space has led to the development of the transport network, especially the construction of underground tunnels, which is usually inevitable in the construction of buildings near deep foundations. When a tunnel is excavated, the surface settlements will result in damage to the surface and deep structures. Therefore, control of surface settlements and other environmental impacts is key to the design of tunnelling projects. Thus, in the present study, using the three-dimensional analysis by Abaqus finite element software, the effect of New Austrian tunnelling method (NATM) including Top heading (TH) and Central diaphragm wall (CDW) on the surface settlements and the forces applied to the single pile and the  $2 \times 2$  pile group was investigated when the tunnel is adjacent to the piles in weathered residual soil. The results showed that the amount of net forces applied to the pile due to tunnelling patterns when running as a pile group was significantly lower than those for the single pile. It was also proved that, in the pile group, the CDW method created a lower amount of net surface settlements and net axial forces compared to the TH method. Also, unlike surface settlements, the influence zone on the pile head settlement in the longitudinal direction can be identified as  $\pm 2D$  in TH, and in the CDW method from  $-2D$  to  $+1D$  from the pile center (behind and ahead of the pile axis), where  $D$  is the tunnel diameter.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 11 June 2020  
**Revise Date:** 18 September 2020  
**Accept Date:** 23 October 2020

### Keywords:

NATM  
Finite Element Method  
Single pile  
Pile group  
Load transfer  
Soil-structure interaction

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.234799.2166>

\*Corresponding author: Seyed Mohammad Mirhosseini  
Email address: m-mirhoseini@iau-arak.ac.ir

## بررسی اثر روش‌های حفاری دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی بر نشست سطحی و گروه شمع

مهرداد میرسپاهی<sup>۱</sup>، سید محمد میرحسینی<sup>۲\*</sup>، آرش نیری<sup>۲</sup>، سید حمید لاجوردی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

### چکیده

در مناطق شهری با تراکم جمعیتی بالا، کمبود فضاهای سطحی سبب توسعه شبکه حمل و نقل به ویژه ساخت تونل‌های مترو شده است که معمولاً ساخت این تونل‌ها نزدیک ساختمان‌های متکی بر پی‌های عمیق امری اجتناب ناپذیر است. زمانی که تونل حفاری می‌شود، نشست حاصل خواهد شد که ممکن است سبب آسیب به سازه‌های سطحی و عمیق شود. بنابراین، کنترل نشست‌های سطحی و سایر اثرات محیطی یک موضوع کلیدی برای طراحی پروژه‌های حفاری تونل می‌باشد. بر این اساس در پژوهش حاضر با استفاده از تحلیل سه بعدی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، اثر الگوهای متداول حفاری تونل به روش جدید اتریشی شامل حفاری دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی بر میزان نشست سطحی زمین و نیروهای وارد بر تک شمع و گروه شمع  $2 \times 2$  زمانی که تونل در مجاورت شمع‌ها قرار دارد در خاک رسوبی هوازده بررسی شد. نتایج نشان داد مقادیر نیروهای خالص وارد بر شمع به علت روش‌های حفاری زمانی که به صورت گروه شمع اجرا می‌شوند به مراتب کمتر از حالتی است که به صورت تک‌شمع اجرا می‌شوند. همچنین ثابت شد روش حفاری دیافراگم میانی حداقل مقادیر نشست سطحی زمین، نشست و نیروی محوری خالص در گروه شمع را در مقایسه با روش حفاری دو مرحله‌ای پلکانی باعث شده است. علاوه بر این، نشست سطحی زمین، نشست بر شمع برخلاف نشست سطحی زمین، وابسته به روش‌های حفاری بوده به طوری که ناحیه تحت تاثیر در روش دو مرحله‌ای پلکانی،  $\pm 2D$  و در روش دیافراگم میانی در محدوده  $2D$  - الی  $D + 1$  از مرکز شمع (قبل و بعد از مرکز شمع) در راستای حفاری است که  $D$  قطر تونل می‌باشد.

کلمات کلیدی: روش NATM، روش اجزاء محدود، تک شمع، گروه شمع، انتقال بار، اندرکنش خاک-سازه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.234799.2166">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.234799.2166</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.234799.2166	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۰۸/۰۲	۱۳۹۹/۰۸/۰۲	۱۳۹۹/۰۶/۲۸	۱۳۹۹/۰۳/۲۲
سید محمد میرحسینی m-mirhoseini@iau-arak.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

پی‌های عمیق بار وارد بر سازه را به داخل اعماق زمین انتقال می‌دهند که این امر سبب تولید تنش در اطراف خاک می‌شود [۱]. بالعکس، حفاری تونل سبب تغییر میدان تنش در اطراف خاک شده که نتیجه آن حرکت و تغییر مکان زمین در اطراف تونل و به تبع آن گسترش این تغییر مکان از طریق خاک به سطح زمین است. به علت کمبود ذاتی و طبیعی فضاهای سطحی در نواحی شهری پرجمعیت، ساخت تونل‌های متروی جدید و ساخت مجاری فاضلاب با قطرهای بزرگتر در کنار پی‌های عمیق که ساختمان‌های بلند متکی به آنها هستند امری اجتناب ناپذیر است. زمانی که تونل حفاری می‌شود، نشست حاصل می‌شود که ممکن است سبب آسیب به سازه‌های سطحی و عمیق شود. بنابراین، کنترل نشست و سایر اثرات محیطی یک موضوع کلیدی برای طراحی پروژه‌های حفاری تونل شده است. در سال‌های اخیر، استفاده از روش جدید اتریشی<sup>۱</sup> برای حفاری‌های شهری با شرایط ساختگاهی سخت افزایش یافته است اگر چه اصول اولیه این روش توسط رابسویچ<sup>۲</sup> [۲] و مولر<sup>۳</sup> [۳] تاسیس و برای حفاری تونل در شرایط ساختگاهی مناسب گسترش یافت [۴ و ۵]. به طور شگفت‌آوری، مطالعات اندکی بر روی اثرات روش‌های مختلف حفاری بر عملکرد حفاری تونل موجود است. باورز<sup>۴</sup> [۶] اثرات سه روش مختلف حفاری به نام‌های double side drift (TS1)، single side drift (TS2) و bench (TS3) را بر روی نشست‌های متروی هیثروی لندن ارزیابی و با مقادیر واقعی مقایسه نمود. در این مطالعه گزارش شد که عملکرد روش حفاری (TS2) از لحاظ نشست بهتر از دو روش حفاری دیگر TS1 و TS3 است. کاراکوس و فول<sup>۵</sup> [۷] بعداً اثرات روش‌های مختلف حفاری تونل بر نشست متروی هیثروی لندن را توسط روش اجزاء محدود به صورت دو بعدی (کرنش مسطح) و سه بعدی ارزیابی کردند. تمرکز مطالعه آنها بر تفاوت نتایج دوبعدی و سه بعدی بود. فاریاس و همکاران<sup>۶</sup> [۸] به بررسی اثرات مراحل حفاری یک تونل فرضی ایده آل بر نشست زمین به صورت سه بعدی پرداختند. برای فهم مکانیزم اندرکنش تونل-خاک-شمع، محققان بسیاری مطالعات میدانی [۹ و ۱۰]، عددی و آزمایشگاهی متعددی را گزارش داده اند [۱۱-۲۴]. مارشال و همکاران<sup>۷</sup> [۱۵] به بررسی اثر عمق و اندازه تونل‌ها در خاک ماسه‌ای بر نشست‌های سطحی زمین پرداختند و گزارش نمودند که با افزایش عمق و اندازه تونل، نشست سطحی زمین به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. لی<sup>۸</sup> [۲۳] به بررسی اثر حفاری تونل دایره‌ای به روش جدید اتریشی با الگوی تمام مقطع بر نیروهای وارد بر تک شمع واقع بر خاک رسوبی هوازده پرداخت. او گزارش کرد حفاری تونل در مجاورت شمع سبب افزایش نیروهای محوری توزیع شده در شمع و لنگر خمشی وارد بر آن می‌شود. سومرو و همکاران<sup>۹</sup> [۲۰] با مطالعه عددی و آزمایشگاهی، اثر حفاری تونل دوقلو را بر تک شمع واقع بر رس سخت مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که حفاری تونل سبب نشست شمع، اضافه نیروی محوری و لنگر خمشی در طول شمع می‌شود که مقدار آن بستگی به موقعیت نسبی تونل و شمع دارد.

اگرچه مطالعات گذشته اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با این پژوهش فراهم نموده است اما اغلب آنها ترجیح داده‌اند که مطالعات خود را بر نشست‌های زمین و حفاری تونل بر تک شمع محدود کنند. در حقیقت، تحقیقات بسیار کمی عملکرد روش‌های مختلف حفاری تونل را به صورت سه بعدی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. با توجه به افزایش استفاده از روش جدید اتریشی و اهمیت کنترل نشست و سایر اثرات محیطی در حفاری تونل‌های شهری، یک نیاز قطعی برای مطالعه عمیق در رابطه با عملکرد روش‌های مختلف حفاری وجود دارد. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر تحلیل عددی سه بعدی اثر حفاری تونل به روش جدید اتریشی<sup>۱۰</sup> با تمرکز بر روش‌های دو مرحله‌ای پلکانی<sup>۱۱</sup> و دیافراگم میانی<sup>۱۲</sup> بر نشست و مکانیزم انتقال بار بر تک شمع و گروه شمع ۲×۲ در خاک رسوبی هوازده است.

<sup>1</sup> New Austrian Tunnelling Method (NATM)

<sup>2</sup> Rabcewicz

<sup>3</sup> Müller

<sup>4</sup> Bowers

<sup>5</sup> Karakus and Fowell

<sup>6</sup> Farias et al

<sup>7</sup> Marshall et al.

<sup>8</sup> Lee

<sup>9</sup> Soomro et al.

<sup>10</sup> New Austrian Tunnelling method (NATM)

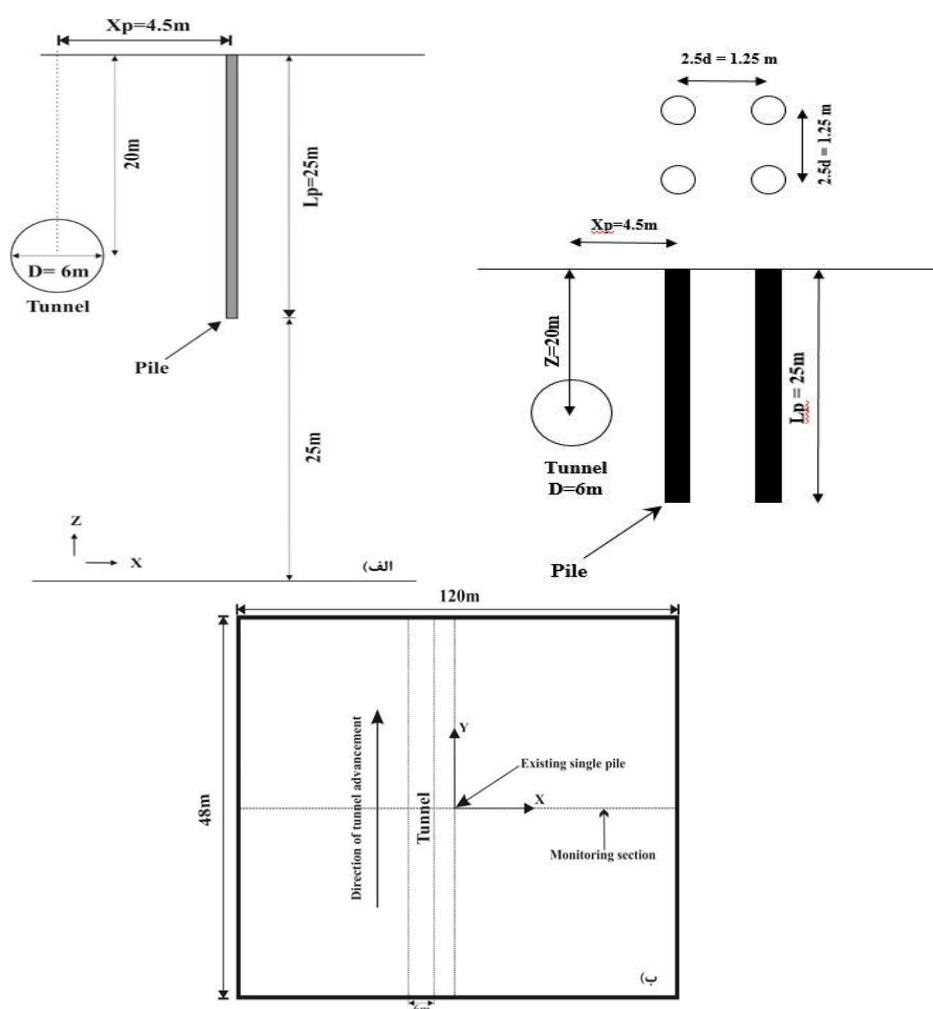
<sup>11</sup> Top heading (TH)

<sup>12</sup> Central diaphragm wall (CDW)

## ۲-مدلسازی اجزاء محدود

## ۲-۱-مش بندی و شرایط مرزی اجزاء محدود

در مطالعه حاضر، روش اجزاء محدود توسط نرم افزار آباکوس<sup>۱۳</sup> [۲۵] در مدل سازی های عددی برای تحلیل سه بعدی اثر روش های حفاری تونل به روش جدید اتریشی بر رفتار تک شمع و گروه شمع در خاک رسوبی هوازده استفاده شد. شکل ۱-الف نمای ارتفاعی وضعیت قرارگیری تونل و شمع را نسبت به هم نشان می دهد. قطر تونل ( $D$ ) برابر با ۶ متر می باشد. طول ( $L_p$ ) و قطر ( $d_p$ ) شمع به ترتیب برابر ۲۵ متر و ۰/۵ متر است. فاصله مرکز تونل با مرکز شمع ۴/۵ متر ( $0.75D$ ) می باشد [۲۳]. فاصله مرکز به مرکز شمع ها در گروه شمع  $2 \times 2$ ،  $2/5d$  که  $d$  قطر شمع ها می باشد و فاصله نزدیک ترین مرکز شمع ها از مرکز تونل ۴/۵ متر ( $0.75D$ ) در نظر گرفته شد. شکل ۱-ب پلان موقعیت قرارگیری تونل و شمع را در مدلسازی های عددی نشان می دهد. طول حفاری تونل ۴۸ متر است که برابر با  $8D$  می باشد. مقطع مورد بررسی مرکز مدل یا مرکز شمع ( $Y/D = 0$ ) انتخاب شد. لازم به ذکر است  $Y$  طول پیشرفت حفاری تونل است که با قطر تونل ( $D$ ) بی بعد شده است.



شکل ۱: هندسه استفاده شده در تحلیل های عددی الف) مقطع عرضی تک شمع و گروه شمع ب) پلان مدل

<sup>13</sup> Abaqus

شکل ۲ مش کلی استفاده شده در مدلسازی‌های اجزاء محدود را نشان می‌دهد. ابعاد مدل برای تمامی مدل‌سازی‌های عددی ۵۰ متر × ۴۸ متر × ۱۲۰ متر می‌باشد. از لحاظ شرایط مرزی، تکیه‌گاه‌های غلتکی<sup>۱۴</sup> و تکیه‌گاه‌های مفصلی<sup>۱۵</sup> به ترتیب در کناره‌های قائم و کف مدل قرار داده شد. بنابراین، کناره‌های قائم مدل فقط در جهت قائم اجازه حرکت دارند و در کف مدل هیچگونه تغییر مکانی در تمامی جهات وجود ندارد. برای مدل‌سازی خاک و شمع از المان‌های ۱۶C3D8R درحالی‌که برای مدل‌سازی شاتکریت تونل از المان S4R<sup>۱۷</sup> استفاده شد. زمین از نوع خاک رسوبی هوازده و روش انجام حفاری تونل روش جدید اتریشی می‌باشد. نزدیک نواحی شمع و خاک به دلیل زیاد بودن گرادیان‌های تغییر شکل‌ها و تنش‌ها ابعاد مش ریزتر از سایر نواحی مدل در نظر گرفته شد. سطح تراز آب زیرزمینی در سطح زمین و فشار حفره‌ای هیدرواستاتیک در طول عملیات حفاری ثابت فرض شد. زمانی که تونل حفاری می‌شود، نشست حاصل می‌شود که ممکن است سبب آسیب به سازه‌های سطحی و عمیق شود. برای کاهش نشست و افزایش پایداری جبهه حفاری، زمانی که از روش جدید اتریشی استفاده می‌شود جبهه حفاری به قسمت‌های مختلفی تقسیم می‌شود. شکل ۳ شاخص‌ترین روش‌های حفاری در روش جدید اتریشی را نشان می‌دهد [۷-۸ و ۴]. لازم به ذکر است عدد ۱ نشان‌دهنده فاز نخست حفاری و عدد ۲ نشان‌دهنده فاز دوم حفاری است. بطور کلی، متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

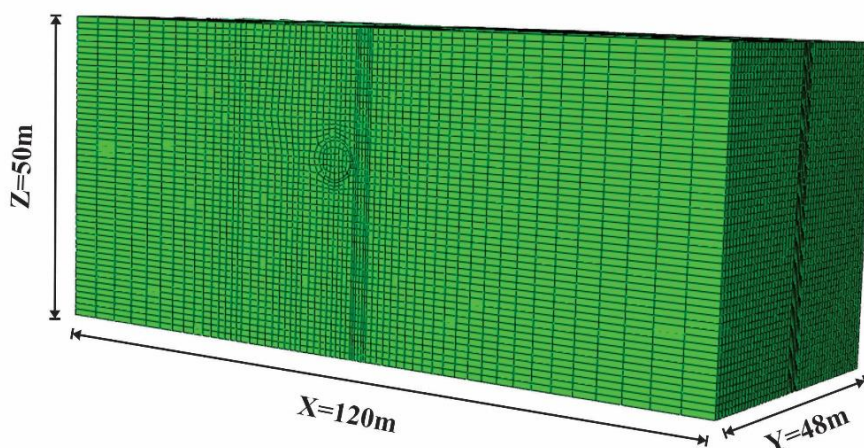
جدول ۱: متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش

حالت‌های مورد بررسی	روش‌های حفاری در نظر گرفته شده
نشست سطحی زمین در حالت زمین آزاد یا بدون ساختمان*	Top heading (TH)
تک شمع**	
گروه شمع ۲ × ۲***	
نشست سطحی زمین در حالت زمین آزاد یا بدون ساختمان	Central diaphragm wall (CDW)
تک شمع	
گروه شمع ۲ × ۲	

\*Greenfield

\*\*Single pile

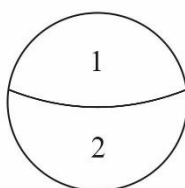
\*\*\* 2 × 2 pile group



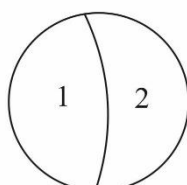
شکل ۲: مش کلی استفاده شده در تحلیل‌های عددی

<sup>14</sup> Roller boundaries<sup>15</sup> Fixed boundaries<sup>16</sup> Eight-node linear brick elements with reduced integration<sup>17</sup> Four-node shell elements with reduced integration

Top heading (TH)



Central diaphragm wall (CDW)



شکل ۳: روش‌های حفاری در نظر گرفته شده در تحلیل‌های عددی [۷-۸ و ۴]

## ۲-۲- خصوصیات مصالح استفاده شده در تحلیل‌های اجزاء محدود

جدول ۲ خصوصیات مصالح استفاده شده در تحلیل‌های عددی را بر اساس معیار گسیختگی موهر کولمب نشان می‌دهد [۲۳]. زاویه اصطکاک خط بحرانی،  $\phi'_c$ ،  $35^\circ$  و زاویه اتساع  $5^\circ$  برای خاک رسوبی هوازده استفاده شد. همچنین، زاویه اصطکاک حداکثر نیز  $40^\circ$  و ضریب اصطکاک بین سطوح تماس شمع و خاک برابر با  $75\%$  زاویه اصطکاک حداکثر در نظر گرفته شد [۲۳].

جدول ۲: خصوصیات مصالح استفاده شده در تحلیل‌های عددی [۲۳]

مصالح	$K_0$ ضریب فشار جانبی در حالت سکون	$\nu$ ضریب پواسون	E (MPa) مدول سختی	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) وزن مخصوص	$c'$ (kPa) چسبندگی	$\phi'_c$ (°) زاویه اصطکاک داخلی
خاک	۰/۵	۰/۲۵	۵۰	۲۰	۱۰	۳۵
شمع	-	۰/۲	۳۰۰۰۰	۲۵	-	-
شاتکریت	-	۰/۲	۱۵۰۰۰	۲۵	-	-

## ۲-۳- مراحل مدل سازی عددی

در تحلیل‌ها، اثر نصب شمع در نظر گرفته نشد. بنابراین رفتار شمع نزدیک به رفتار شمع درجاریز<sup>۱۸</sup> می‌باشد. هر تحلیل عددی مطابق با مراحل زیر مدل شده است [۲۳]:

مرحله ۱. اعمال تنش‌های برجا

مرحله ۲. اعمال نیروی محوری شمع تحت بار مجاز

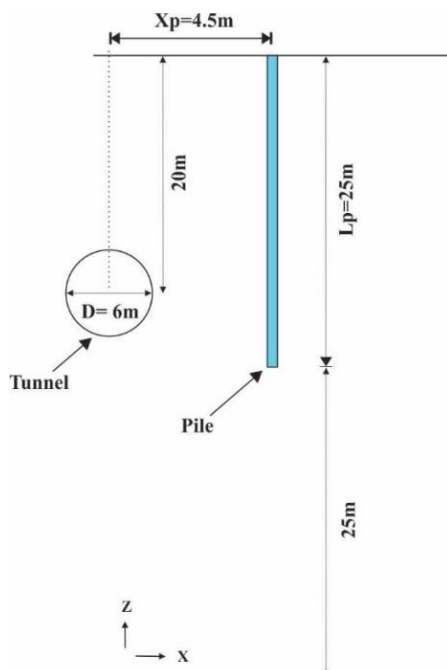
مرحله ۳. مراحل حفاری تونل

پس از مرحله اعمال تنش‌های برجا، نیروی ۹۲۵ کیلونیوتن قبل از حفاری تونل بر سر شمع اعمال شد. سپس حفاری تونل در ۴۸ مرحله مدلسازی شد. گام حفاری تونل در هر مرحله ۱ متر، ضخامت شاتکریت ۲۰۰ میلیمتر و ناحیه مهار نشده حین حفاری ۱ متر فرض گردید. ذکر این نکته حائز اهمیت است که برای گروه شمع، بار مجاز به صورت جداگانه به بالای هر شمع اعمال شد.

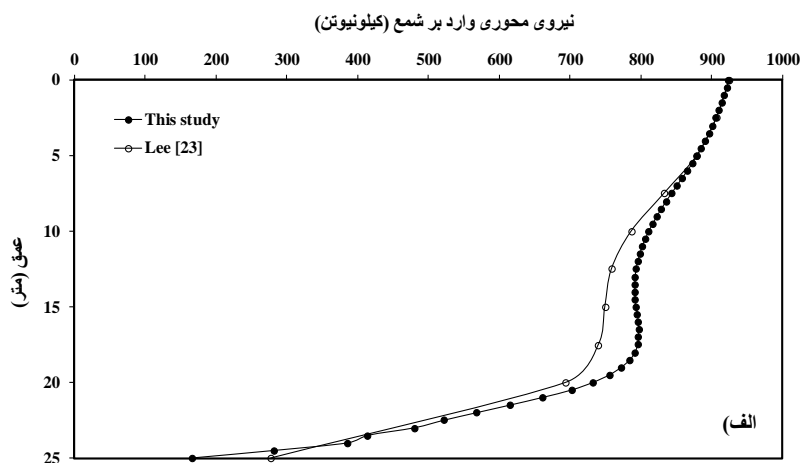
<sup>18</sup> Bored pile

## ۳- صحت سنجی تحلیل‌های اجزاء محدود

روش استفاده شده در پژوهش حاضر با مقایسه نتایج روش اجزاء محدود گزارش شده توسط لی<sup>۱۹</sup> [۲۳] صحت سنجی شد. او اثر حفاری تونل تک به روش جدید اتریشی با الگوی تمام مقطع<sup>۲۰</sup> را بر رفتار تک‌شمع زمانی که تونل از مجاورت آن عبور می‌کند (نشان داده شده در شکل ۴) در خاک رسوبی هوازده به صورت سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به شکل ۵، اختلاف نتایج بدست آمده در محل محور تونل، برای نیروی محوری وارد بر شمع در حالت  $Y/D = 0$  و لنگر خمشی مورد بر شمع در حالت  $Y/D = +4$  به ترتیب برابر با: ۷ درصد و ۸ درصد بدست آمده است. بنابراین، مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از این مدل‌سازی تطابق مناسبی با نتایج گزارش شده توسط لی<sup>۲۱</sup> [۲۳] دارد.



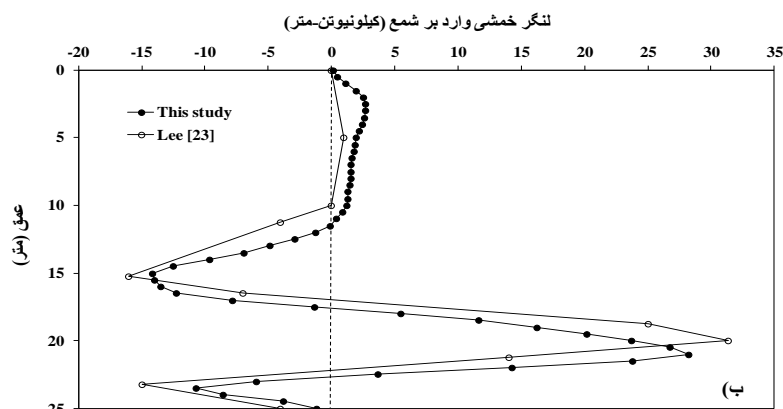
شکل ۴: مقطع عرضی در نظر گرفته شده در تحلیل‌های لی [۲۳]



<sup>19</sup> Lee

<sup>20</sup> Full-face

<sup>21</sup> Lee

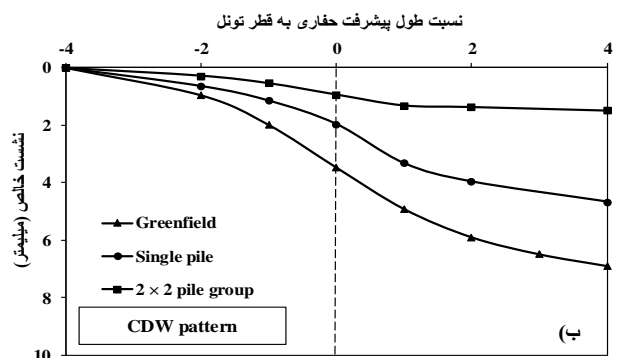
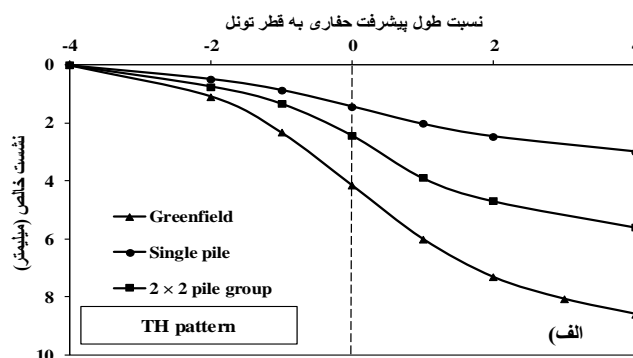


شکل ۵: مقایسه نتایج محاسبه شده پژوهش حاضر با تحقیق لی (الف) نیروی محوری وارد بر شمع (ب) لنگر خمشی وارد بر شمع

#### ۴- تفسیر نتایج محاسبه شده

##### ۴-۱- اثر روش‌های حفاری بر نشست سطحی زمین و نشست شمع‌ها

شکل ۶ تغییرات نشست سطحی زمین در حالت زمین آزاد یا بدون ساختمان<sup>۲۲</sup> و نشست خالص سر شمع را در مراحل مختلف حفاری تونل نشان می‌دهد. به عبارت دیگر نشست سطحی زمین و نشست سر شمع قبل از حفاری تونل صفر می‌باشد. مشاهده می‌شود با پیشرفت حفاری تونل در دو روش دو مرحله‌ای پلکانی<sup>۲۳</sup> و دیافراگم میانی<sup>۲۴</sup> بر مقادیر نشست‌های سطحی زمین و نشست‌های سر شمع در تک‌شمع و گروه شمع افزوده می‌شود.



شکل ۶: تغییرات نشست سطحی زمین و نشست خالص سر شمع در مراحل مختلف حفاری تونل در روش الف) دو مرحله‌ای پلکانی (ب) دیافراگم میانی

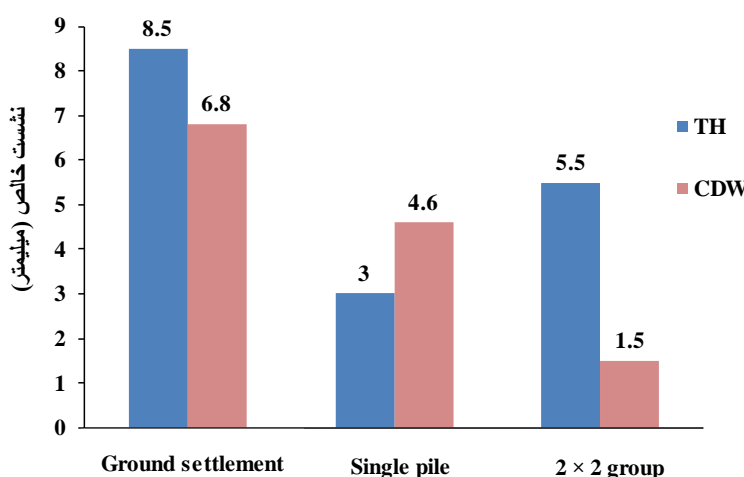
<sup>22</sup> Greenfield

<sup>23</sup> Top heading (TH)

<sup>24</sup> Central diaphragm wall (CDW)



شکل ۷ به منظور مقایسه کمی اثر روش‌های حفاری بر نشست سطحی زمین و نشست خالص سر شمع در حالت تک‌شمع و گروه شمع، ارائه شده است. می‌توان مشاهده نمود حداکثر نشست سطحی زمین به علت حفاری تونل در روش دو مرحله‌ای پلکانی<sup>۲۵</sup>، ۲۸٪ نشست تک‌شمع است. بعلاوه، حداکثر نشست سطحی زمین به علت حفاری تونل در روش دیافراگم میانی<sup>۲۶</sup>، ۴۵٪ نشست گروه شمع محاسبه شده است. همچنین مشاهده می‌شود روش دیافراگم میانی سبب کاهش ۲۰٪ نشست سطحی زمین و کاهش ۷۲/۷٪ نشست سر شمع در حالت گروه شمع نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی شده است. این در حالی است که روش دو مرحله‌ای پلکانی سبب کاهش ۳۴/۸٪ نشست سر شمع نسبت به روش دیافراگم میانی در حالت تک‌شمع شده است.



شکل ۷: مقایسه اثر روش‌های حفاری بر نشست سطحی زمین، نشست خالص تک شمع و گروه شمع

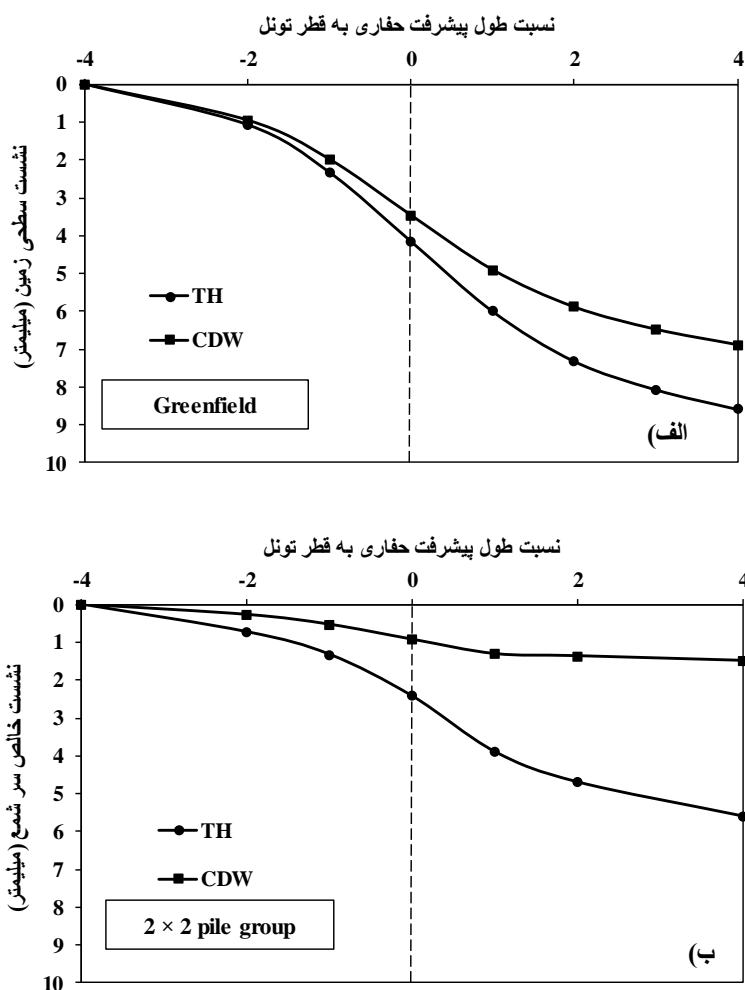
شکل ۸ عملکرد روش‌های حفاری دو مرحله‌ای پلکانی<sup>۲۷</sup> و دیافراگم میانی<sup>۲۸</sup> را در مراحل مختلف حفاری تونل بر نشست‌های سطحی زمین و نشست خالص سر شمع در دو حالت تک‌شمع و گروه شمع نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸-الف یک افزایش غیرخطی در نشست سطحی زمین ناشی از روش‌های حفاری تونل مشاهده می‌شود. با پیشرفت حفاری تونل، حداکثر نشست سطحی زمین زمانی که جبهه حفاری تقریباً به ۲D قبل از  $Y/D = 0$  می‌رسد به آرامی افزایش می‌یابد. نرخ نشست سطحی زمین با رسیدن جبهه حفاری به  $Y/D = 0$  افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در دو روش حفاری دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی مابین فاصله  $Y/D = -2$  و  $Y/D = +3$ ، حدود ۹۴٪ نشست نهایی سطحی زمین در این فاصله رخ می‌دهد می‌توان ناحیه تحت تاثیر نشست سطحی زمین ناشی از حفاری تونل را مستقل از روش‌های حفاری و در محدوده  $-2D$  الی  $+3D$  که D قطر تونل می‌باشد معرفی نمود. شکل ۸-ب نشان می‌دهد با پیشرفت حفاری تونل، نشست سر شمع زمانی که جبهه حفاری تقریباً به ۲D قبل از مرکز شمع می‌رسد به آرامی افزایش می‌یابد. نرخ نشست سر شمع با رسیدن جبهه حفاری به مرکز شمع ( $Y/D = 0$ ) افزایش می‌یابد و با توجه اینکه در روش دو مرحله‌ای پلکانی مابین فاصله  $Y/D = \pm 2$ ، حدود ۹۳٪ نشست نهایی سر شمع رخ می‌دهد می‌توان ناحیه اثر حفاری تونل بر نشست سر شمع را  $\pm 2D$  و با توجه به اینکه در روش دیافراگم میانی مابین فاصله  $Y/D = -2$  و  $Y/D = +1$  حدود ۹۸٪ نشست نهایی سر شمع رخ می‌دهد می‌توان ناحیه اثر حفاری تونل بر اساس نشست سر شمع را برای گروه شمع، در محدوده  $-2D$  و  $+1D$  از مرکز شمع در جهت حفاری معرفی نمود که D قطر تونل می‌باشد. بنابراین ناحیه اثر حفاری تونل برای گروه شمع از لحاظ نشست سر شمع برخلاف نشست سطحی زمین به شدت به روش‌های حفاری وابسته می‌باشد.

<sup>25</sup> Top heading (TH)

<sup>26</sup> Central diaphragm wall (CDW)

<sup>27</sup> Top heading (TH)

<sup>28</sup> Central diaphragm wall (CDW)



شکل ۸: مقایسه عملکرد روش‌های حفاری دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی در مراحل مختلف حفاری تونل (الف) نشست سطحی زمین، (ب) نشست خالص سر شمع

## ۲-۴-۲ اثر روش‌های حفاری بر نیروی محوری وارد بر شمع

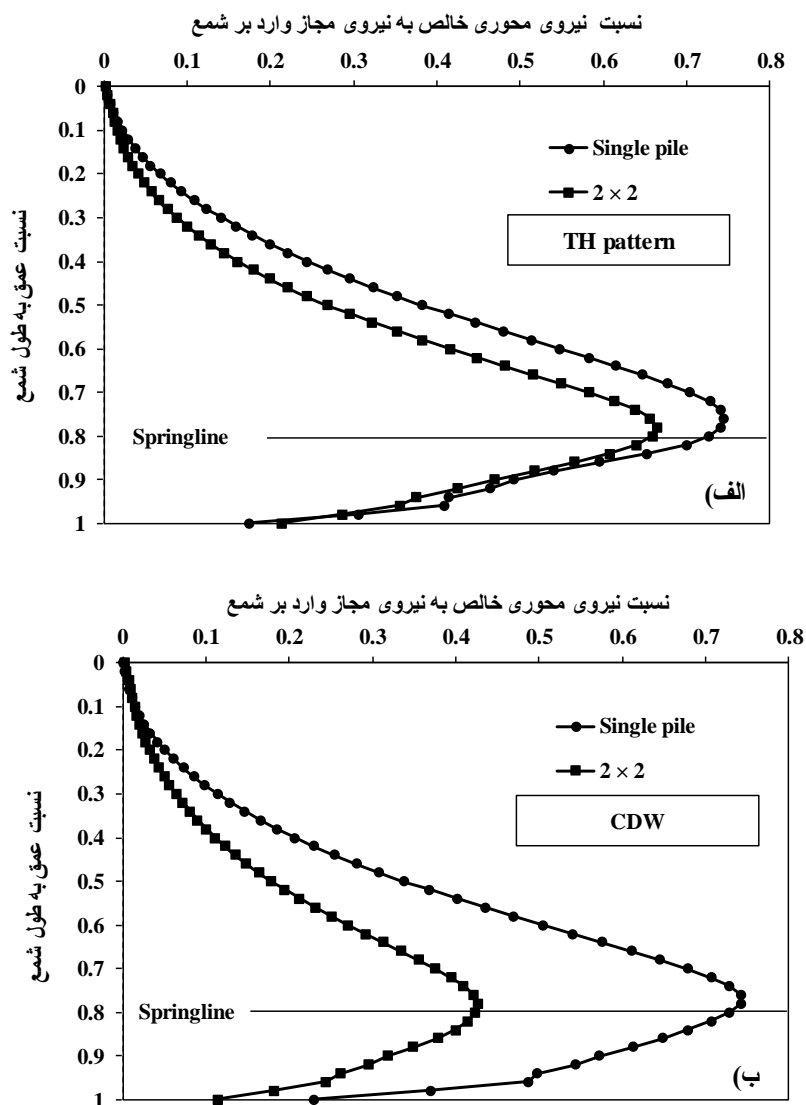
شکل ۹ توزیع بی بعد شده نیروی محوری خالص ( $P_{net}/P_a$ ) نسبت به عمق که با طول شمع بی بعد شده است ( $Z/L_p$ ) در روش‌های مختلف حفاری (دو مرحله‌ای پلکانی<sup>۲۹</sup> و دیافراگم میانی<sup>۳۰</sup>) برای تک‌شمع و گروه شمع  $2 \times 2$  را در انتهای حفاری تونل نشان می‌دهد. لازم به ذکر است  $P_{net}$  نیروی محوری وارد بر شمع در هر عمق معین به علت حفاری تونل و  $P_a = 925$  کیلونیوتن بار مجاز وارد بر شمع قبل از حفاری تونل می‌باشد. به عبارت دیگر توزیع نیروی شمع قبل از حفاری تونل صفر می‌باشد. همانطور که از شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود به علت حرکت رو به پایین خاک ناشی از حفاری تونل، نیروی محوری خالص وارد بر شمع نسبت به عمق به تدریج از سر شمع تا محدوده محور تونل<sup>۳۱</sup> افزایش می‌یابد و با عبور از محور تونل به تدریج کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود در دو روش دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی حداکثر نیروی محوری خالص وارد بر تک شمع و گروه شمع با کامل شدن حفاری تونل، نزدیک محور تونل رخ داده است. لازم به ذکر است در دو روش حفاری در نظر گرفته شده، نیروی محوری خالص ایجاد شده توسط حفاری تونل در گروه شمع به مراتب کمتر از تک-

<sup>29</sup> Top heading (TH)

<sup>30</sup> Central diaphragm wall (CDW)

<sup>31</sup> Springline

شمع می‌باشد. بنابراین می‌توان اینگونه بیان نمود زمانی که شمع‌ها به صورت گروه شمع اجرا می‌شوند نیروی محوری کمتری در اثر حفاری تونل به آنها اعمال می‌شود.

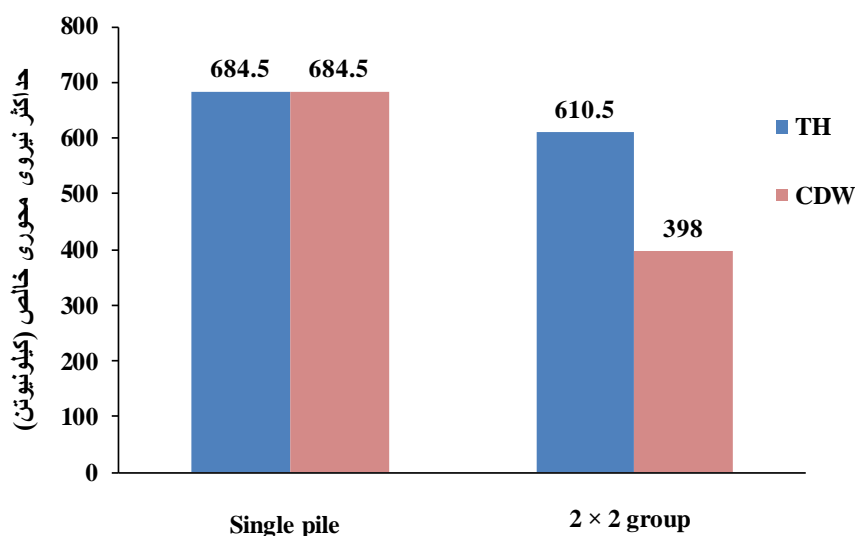


شکل ۹: توزیع بی بعد شده نیروی محوری خالص وارد بر تک شمع و گروه شمع نسبت به عمق در الف) روش دو مرحله‌ای پلکانی ب) روش دیافراگم میانی

شکل ۱۰ به منظور مقایسه کمی اثر روش‌های حفاری بر حداکثر نیروی خالص سر شمع در حالت تک‌شمع و گروه شمع، ارائه شده است. مشاهده می‌شود زمانی که شمع‌ها به صورت گروه شمع اجرا می‌شوند در روش دو مرحله‌ای پلکانی<sup>۳۲</sup>، حداکثر نیروی محوری خالص وارد بر شمع ۱۱٪ و در روش دیافراگم میانی<sup>۳۳</sup>، حداکثر نیروی محوری خالص وارد بر شمع ۴۲٪ کاهش می‌یابند. ذکر این نکته حائز اهمیت است با مقایسه روش‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود روش دیافراگم میانی سبب کاهش ۳۵٪ حداکثر نیروی محوری خالص وارد بر گروه شمع نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی شده است.

<sup>۳۲</sup> Top heading (TH)

<sup>۳۳</sup> Central diaphragm wall (CDW)



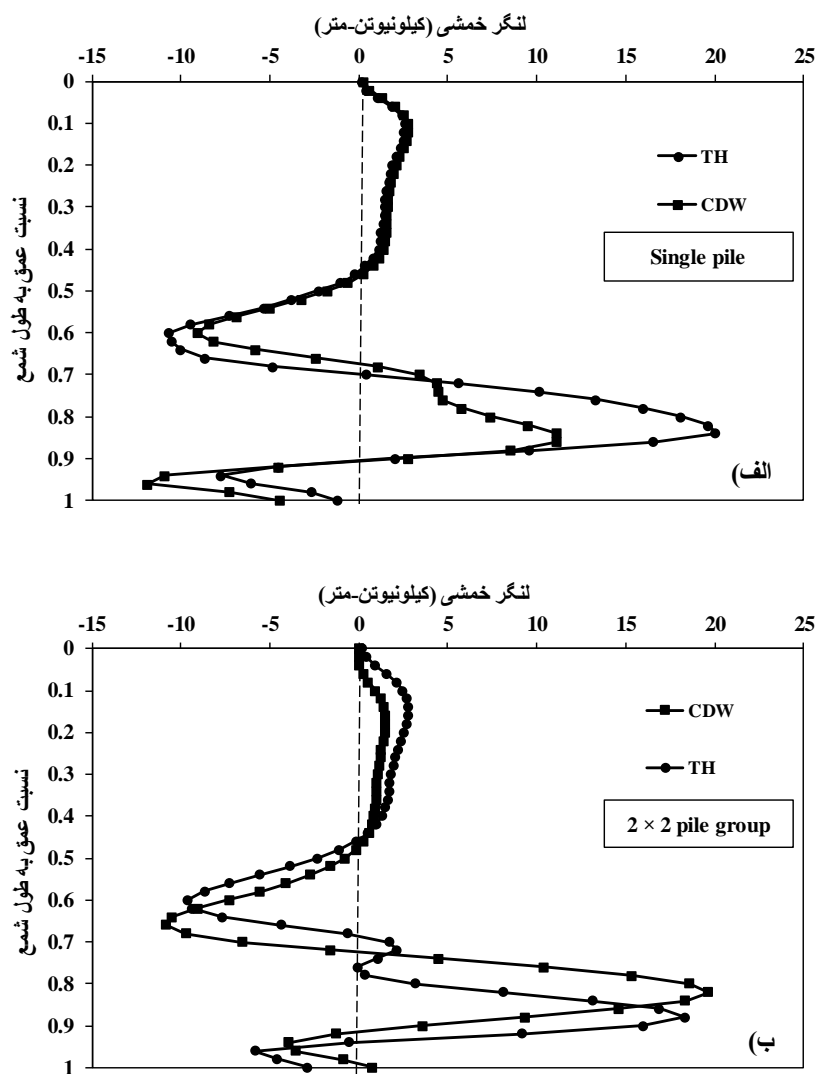
شکل ۱۰: مقایسه اثر روش‌های حفاری بر حداکثر نیروی محوری خالص تک شمع و گروه شمع

### ۳-۴- اثر روش‌های حفاری بر لنگر خمشی وارد بر شمع

شکل ۱۱ لنگر خمشی وارد بر شمع ناشی از روش‌های مختلف حفاری تونل (دو مرحله‌ای پلکانی<sup>۳۴</sup> و دیافراگم میانی<sup>۳۵</sup>) را برای تک‌شمع و گروه شمع ۲ × ۲ در انتهای حفاری تونل نشان می‌دهد. لازم به ذکر است لنگر خمشی مثبت به معنای اعمال تنش فشاری در طول شمع ناشی از حفاری تونل می‌باشد. لنگر خمشی ایجاد شده در شمع از پروفایل تغییر شکل شمع  $[f(x)]$ ، که  $f(x)$  تغییر شکل جانبی در مرکز شمع می‌باشد محاسبه شده است. همچنین، لنگر خمشی از معادله  $M = EI \times \left(\frac{d^2 f(x)}{dz^2}\right)$  که  $I$  ممان اینرسی و  $dz$  فاصله قائم مابین دو نقطه مورد بررسی می‌باشد محاسبه شده است. همانطور که از شکل ۱۱-الف می‌توان مشاهده نمود حداکثر لنگر خمشی ناشی از حفاری تونل در دو روش دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی نزدیک محور تونل  $Z/L_p = 0/8$  رخ داده و مقادیر آن برای روش دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی به ترتیب برابر با: ۲۰ کیلو نیوتن-متر و ۱۱ کیلو نیوتن-متر محاسبه شد. با فرض مقاومت خمشی مجاز بتن ۷/۵ مگاپاسکال، لنگر خمشی مجاز را می‌توان ۹۲ کیلو نیوتن-متر محاسبه نمود [۲۳]. این مقادیر به ترتیب در حدود ۲۲٪ و ۱۲٪ ظرفیت مجاز بتن است. بنابراین مقادیر لنگر خمشی وارد بر تک‌شمع به شدت به روش‌های حفاری وابسته است. علت کاهش لنگر خمشی به صورت ناگهانی و سپس افزایش آن را می‌توان به تغییر میدان تنش به علت حفاری تونل و به تبع آن گسترش تغییر شکل‌های زمین بر شمع‌ها نسبت داد. در روش‌های حفاری، به علت حرکت رو به پایین خاک، لنگر خمشی وارد بر شمع نسبت به عمق از سر شمع به تدریج کاهش یافته و با نزدیک شدن به محور تونل افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد روش دیافراگم میانی سبب کاهش ۴۵٪ لنگر خمشی وارد بر تک‌شمع نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی شده است. با توجه به شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود اثر دو روش در نظر گرفته شده بر لنگر خمشی وارد بر گروه شمع تقریباً یکسان است.

<sup>34</sup> Top heading (TH)

<sup>35</sup> Central diaphragm wall (CDW)



شکل ۱۱: مقایسه عملکرد روش‌های حفاری دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی بر لنگر خمشی وارد بر الف) تک شمع ب) گروه شمع

## ۵- نتایج

در پژوهش حاضر با استفاده از تحلیل سه‌بعدی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، اثر روش‌های متداول حفاری تونل به روش جدید اتریشی شامل دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی بر میزان نشست سطحی زمین و نیروهای وارد بر تک‌شمع و گروه شمع  $2 \times 2$  زمانی که تونل در مجاورت شمع‌ها قرار دارد در خاک رسوبی هوازده بررسی شد. بر اساس شرایط زمین، هندسه و مدلسازی روش حفاری تونل نتایج زیر می‌تواند ارائه گردد.

- روش دیافراگم میانی نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی میزان نشست سطحی کمتری را باعث شد به طوری که روش دیافراگم میانی سبب کاهش ۲۰ درصدی مقادیر نشست سطحی زمین نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی شد. همچنین، ثابت شد ناحیه اثر حفاری تونل بر نشست‌های سطحی زمین مستقل از روش‌های حفاری بوده و می‌توان این ناحیه را در محدوده  $2D$  - و  $3D$  + که  $D$  قطر تونل می‌باشد معرفی نمود.

- در دو روش مورد مطالعه زمانی که شمع‌ها به صورت گروه شمع اجرا می‌شوند به مراتب نیروی محوری خالص کمتری در اثر حفاری تونل به شمع‌ها اعمال می‌گردد. مشاهده شد روش دیافراگم میانی نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی نیروی محوری خالص کمتری را بر گروه شمع باعث شده است به طوری که روش دیافراگم میانی سبب کاهش ۳۵٪ نیروها نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی می‌شود.

- مقایسه دو روش دو مرحله‌ای پلکانی و دیافراگم میانی نشان داد روش‌های حفاری اثری متفاوت بر نشست‌های خالص سر شمع داشته به طوری که حداقل مقدار نشست سر شمع در گروه شمع، مربوط به روش دیافراگم میانی می‌باشد. بعلاوه، ثابت شد، روش دیافراگم میانی سبب کاهش ۷/۷۲٪ مقادیر نشست خالص سر شمع نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی شده است. همچنین، ناحیه تحت تاثیر ناشی از حفاری تونل بر نشست خالص سر شمع برخلاف نشست‌های سطحی، به روش‌های حفاری وابسته بوده به طوری که ناحیه تحت تاثیر ناشی از حفاری تونل در روش دو مرحله‌ای پلکانی،  $\pm 2D$  و در روش دیافراگم میانی در محدوده  $2D$  - الی  $1D$  + از مرکز شمع (قبل و بعد شمع) در راستای حفاری می‌باشد.
- مشاهده شد روش دیافراگم میانی سبب کاهش ۴۵٪ لنگر خمشی وارد بر تک شمع نسبت به روش دو مرحله‌ای پلکانی شده است. این در حالی است که، اثر دو روش در نظر گرفته شده بر لنگر خمشی وارد بر گروه شمع تقریباً یکسان است.
- برخلاف آنچه که در تاریخچه موضوع بیان شد با توجه به مجموع نتایج تحلیل‌های انجام شده در این مطالعه، مشخص شد روش‌های حفاری اثری متفاوت بر نشست‌های سطحی زمین، نیروهای وارد بر شمع و ناحیه اثر حفاری بر شمع‌ها دارد. همچنین مشاهده شد، از میان روش‌های حفاری مورد بررسی، روش حفاری دو مرحله‌ای پلکانی روشی نامناسب بوده در حالیکه استفاده از روش حفاری دیافراگم میانی تا حد زیادی اثرات نامطلوب احداث تونل‌های کم‌عمق را بر نشست‌های سطحی زمین، نشست و نیروهای وارد بر گروه شمع برطرف خواهد ساخت.

## مراجع

- [1] Wang, L. Z., Chen, K. X., Hong, Y., and Ng, C. W. W. (2015). Effect of consolidation on responses of a single pile subjected to lateral soil movement. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(6), 769-782.
- [2] Rabcewicz, L. V. (1965). The new Austrian tunnelling method. *Water Power*, 511-515.
- [3] Müller, L. (1978). Removing misconceptions on the New Austrian tunnelling method. *Tunnels & Tunnelling International*, 10(8).
- [4] Yoo, C. (2009). Performance of multi-faced tunnelling—A 3D numerical investigation. *Tunnelling and underground space technology*, 24(5), 562-573.
- [5] Yoo, C. (2013). Interaction between tunneling and bridge foundation—A 3D numerical investigation. *Computers and Geotechnics*, 49, 70-78.
- [6] Bowers, K. H. (1997). *An appraisal of the New Austrian Tunnelling Method in soil and weak rock*. Doctoral dissertation, University of Leeds.
- [7] Karakus, M., & Fowell, R. J. (2006). 2-D and 3-D finite element analyses for the settlement due to soft ground tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3), 392-392.
- [8] De Farias, M. M., Junior, A. H. M., and De Assis, A. P. (2004). Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations. *Tunnelling and underground space technology*, 19(3), 283-293.
- [9] Boonyarak, T., Phisitkul, K., Ng, C. W., Teeparaksa, W., and Aye, Z. Z. (2014). Observed ground and pile group responses due to tunneling in Bangkok stiff clay. *Canadian geotechnical journal*, 51(5), 479-495.
- [10] Wang, Z., Zhang, K. W., Wei, G., Li, B., Li, Q., and Yao, W. J. (2018). Field measurement analysis of the influence of double shield tunnel construction on reinforced bridge. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 252-264.
- [11] Soomro, M. A., Ng, C. W. W., Memon, N. A., and Bhanbhro, R. (2018). Lateral behaviour of a pile group due to side-by-side twin tunnelling in dry sand: 3D centrifuge tests and numerical modelling. *Computers and Geotechnics*, 101, 48-64.
- [12] Wang, Z., Yao, W., Cai, Y., Xu, B., Fu, Y., and Wei, G. (2019). Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shallow-buried twin-tunnel in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 520-532.
- [13] Li, B., and Wang, Z. Z. (2019). Numerical study on the response of ground movements to construction activities of a metro station using the pile-beam-arch method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 209-220.
- [14] Marshall, A. M., and Mair, R. J. (2011). Tunneling beneath driven or jacked end-bearing piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(12), 1757-1771.
- [15] Marshall, A. M., Farrell, R. P., Klar, A., and Mair, R. (2012). Tunnels in sands: the effect of size, depth and volume loss on greenfield displacements. *Géotechnique*, 62(5), 385-399.
- [16] Ng, C. W. W., and Lu, H. (2014). Effects of the construction sequence of twin tunnels at different depths on an existing pile. *Canadian geotechnical journal*, 51(2), 173-183.

- [17] Ng, C. W. W., Lu, H., and Peng, S. Y. (2013). Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunnelling on an existing pile. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 189-199.
- [18] Ng, C. W. W., Soomro, M. A., and Hong, Y. (2014). Three-dimensional centrifuge modelling of pile group responses to side-by-side twin tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 350-361.
- [19] Ng, C. W. W., Hong, Y., and Soomro, M. A. (2015). Effects of piggyback twin tunnelling on a pile group: 3D centrifuge tests and numerical modelling. *Geotechnique*, 65(1), 38-51.
- [20] Soomro, M. A., Hong, Y., Ng, C. W. W., Lu, H., and Peng, S. (2015). Load transfer mechanism in pile group due to single tunnel advancement in stiff clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 63-72.
- [21] Huang, M., Zhang, C., and Li, Z. (2009). A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 410-422.
- [22] Hong, Y., Soomro, M. A., and Ng, C. W. W. (2015). Settlement and load transfer mechanism of pile group due to side-by-side twin tunnelling. *Computers and Geotechnics*, 64, 105-119.
- [23] Lee, C. J. (2012). Numerical analysis of the interface shear transfer mechanism of a single pile to tunnelling in weathered residual soil. *Computers and Geotechnics*, 42, 193-203.
- [24] Lee, C. J. (2013). Numerical analysis of pile response to open face tunnelling in stiff clay. *Computers and Geotechnics*, 51, 116-127.
- [25] Manual, A. U. (2010). Version 6.10. *Abaqus Inc.*