

## Three-Dimensional Study of Natm Tunneling Near Deep Foundations

G.Reza Havaei<sup>1\*</sup>, M.Ali Omid<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil and Environment Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

2- M.Sc Student, Department of Civil and Environment Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

As the population grew, cities expanded rapidly, requiring Super structures for residents to live in, as well as heavy structures such as bridges for faster population access to various locations. Also in big cities, tunnels are needed for various purposes, such as moving facilities, car lanes and subway tunnels, which is one of the concerns of engineers. On the other hand, most of these tunnels are built in cities in the vicinity of heavy structures that deliberately have deep and semi-deep foundations. Tunnel excavation has caused long-term and short-term displacements at the ground surface, which is more pronounced in piles adjacent to the tunnel excavation site. In such a way that the displacements formed in the ground are transferred to the piles and cause axial force in the piles. All these studies on the effects of drilling on adjacent structures and piles are very important in terms of drilling safety factor. Accordingly, in the present study, a three-dimensional analysis has been performed using ABAQUS finite element software. The effects of tunnel drilling with different diameters and locations on the deep foundation in the bridge near the drilling site have been investigated. The results showed that tunnel location, if improperly selected, has destructive effects on pile tip settlements, axial force changes of piles and tunnel surface settlements. Similarly, as the diameter of the tunnel increases, the number of piles in the pile increases sharply when the tunnel is located just below the tunnel site. Also, as the diameter of the tunnel increases, the number of piles in the pile group increases by about 29% when the tunnel is located just below the pile group. When the construction site of the tunnel is located between the group of piles and at a greater depth than the tip of the piles, the amount of settlements changes to a critical state and with increasing the diameter of the tunnel, the rate of subsidence of the pile tip increases by 48.9% and the amount of subsidence Increases by 54%.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 23 September 2020

Revise Date: 15 July 2021

Accept Date: 31 July 2021

### Keywords:

Soil and structure of interaction;  
Pile Group;  
Numerical modeling;  
Surface settlement;  
Tip Pile settlement.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.249466.2252

\*Corresponding author: G.Reza Havaei  
Email address: havaei@aut.ac.ir

## بررسی سه بعدی تونل زنی به روش اتریشی در مجاورت فونداسیون های عمیق

غلامرضا هوایی<sup>۱\*</sup>، محمدعلی امید<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

با افزایش روزافزون جمعیت، شهرها نیازمند سازه های بلندمرتبه برای زندگی ساکنان و سازه های سنگینی همچون پل ها برای دسترسی های سریع تر جمعیت می باشند. همینطور در شهرهای بزرگ نیازمند تونل هایی برای مقاصد مختلف همچون جابجایی تاسیسات، معابر خودروها و تونل های مترو که یکی از دغدغه های مهندسين می باشد. از طرفی اکثر این تونل ها در شهرها در مجاورت سازه های سنگینی که عمدا دارای فونداسیون های عمیق و نیمه عمیق می باشند احداث می شوند. حفاری تونل باعث ایجاد جابجایی های بلندمدت و کوتاه مدت در سطح زمین شده است که این تاثیرات در شمع های موجود در مجاورت محل حفاری تونل بیشتر می باشد. طوری که جابجایی های شکل گرفته در زمین به شمع ها انتقال یافته و باعث ایجاد نیروی محوری در شمع می گردد. تمامی این بررسی ها حول اثرات حفاری بر روی سازه ها و شمع های مجاور از منظر ضریب ایمنی حفاری بسیار حائز اهمیت می باشد. بر این اساس در پژوهش حاضر به تحلیل سه بعدی با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS اثرات حفاری تونل با قطرها و جانمایی های مختلف بر روی فونداسیون عمیق موجود در پل در محل حفاری پرداخته شده است. نتایج نشان داد که جانمایی تونل در صورتی که بصورت نامناسب انتخاب شود، دارای اثرات مخربی در نشست های نوک شمع ها، تغییرات نیرو محوری شمع ها و نشست های سطحی تونل خواهد بود. همچنین با افزایش قطر تونل، میزان نشست های گروه شمع ها زمانی که تونل دقیقا در زیر محل گروه شمع ها قرار دارد در حدود ۲۹٪ افزایش می یابد. هنگامی که محل احداث تونل مابین گروه شمع ها و در عمقی بالاتر نسبت به نوک شمع ها قرار می گیرد میزان نشست ها به حالت بحرانی تغییر کرده و با افزایش قطر تونل، میزان نشست نوک شمع حداکثر ۴۸/۹٪ افزایش و میزان نشست سطح زمین نیز، ۵۴/۳٪ افزایش می یابد.

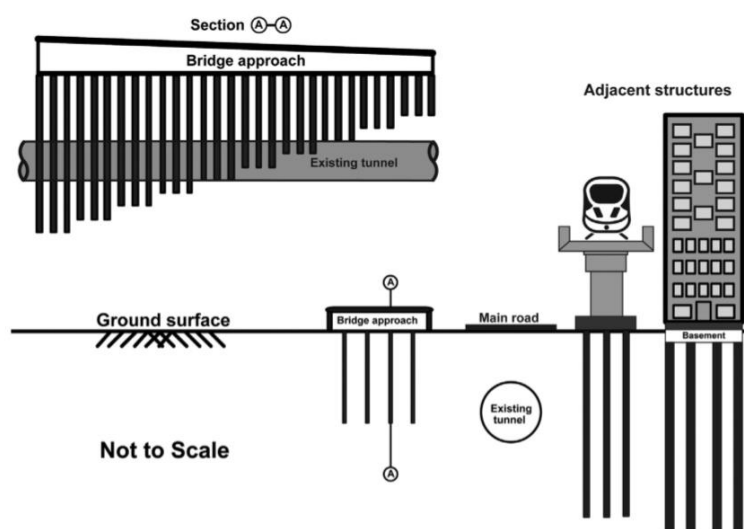
کلمات کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، گروه شمع، نشست سطحی زمین، نشست نوک شمع، مدل سازی عددی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2021.249466.2252	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.249466.2252	۱۴۰۰/۰۵/۳۰	۱۴۰۰/۰۵/۰۹	۱۴۰۰/۰۵/۰۹	۱۴۰۰/۰۴/۲۴	۱۳۹۹/۰۷/۰۲
				*نویسنده مسئول:		
				غلامرضا هوایی		
				havaei@aut.ac.ir		پست الکترونیکی:

## ۱- مقدمه

ساخت خطوط جدید مترو روشی مؤثر برای کاهش ترافیک در مناطق پر ازدحام است. در دو دهه گذشته، بسیاری از خطوط مترو در مناطق پر ازدحام شهری نزدیک به فونداسیون‌های عمیق ساخته شده است. هنگامی که یک تونل‌زنی در مجاورت فونداسیون عمیق انجام می‌شود، فرایند تونل‌زنی سبب تغییر شکل خاک اطراف گروه شمع‌ها و نشست‌های سطحی می‌شود. پیچیدگی خواص خاک و روند ساخت و ساز باعث می‌شود که پاسخ تونل‌زنی به گروه شمع‌های مجاور بسیار پیچیده و غیرقابل پیش بینی باشد [1].

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. تأثیرات ناشی از شمع‌های تحت بارگذاری باعث تغییر در وضعیت تنش و تغییر شکل خاک‌های اطراف می‌شود که در نتیجه تحمیل بار اضافی بر روی سازه تونل یا یک سیستم عملیاتی خواهد بود [19,21-22].



شکل ۱- انواع مختلفی از سازهایی که امکان احداث آن در مجاورت تونل‌ها وجود دارد [22]

به منظور درک مکانیزم‌های اندرکنش بین خاک-شمع-تونل، بسیاری از محققان مطالعات بسیاری انجام داده‌اند. [4,6-7,9] همچنین مطالعات متعددی صورت گرفته است که بر روی تاثیر تونل بر فونداسیون شمع مجاور از طریق روش‌های عددی مانند [10-14,24] متمرکز شده‌اند. اما تنها چند تحقیق بر روی تاثیر اجرای شمع‌های جدید بر روی تونل‌های موجود متمرکز شده‌اند. [15-19] یافته‌ها حاکی از آن بودند که تونل سازی نزدیک شمع موجود می‌تواند باعث تغییرات قابل توجهی در جابجایی عمودی شمع‌های محوری القا شده شود.

همانطور که توسط یو<sup>۱</sup> [2] نشان داده شد، استفاده از روش جدید اتریشی<sup>۲</sup> در مناطق شهری با شرایط دشوار زمین در سال‌های اخیر افزایش یافته است، اگر چه اصول روش جدید اتریشی که توسط مولر<sup>۳</sup> و رابکوز<sup>۴</sup> [25-26] ایجاد شده‌اند، برای تونل زنی در تحت شرایط مناسب زمینی ایجاد شده‌اند. هنگامی که روش اتریشی در حضور یک ساختمان یا پل موجود اجرا می‌شود، اهمیت درک اثرات حاصل بر سازه‌های موجود کاملاً واضح است. پدرو و همکارانش<sup>۵</sup> [30] با مدلسازی سه بعدی تونل اثرات تونل زنی را بر روی گروه شمع‌های موجود در خاک رسی لندن بررسی کند. در این مدلسازی به بررسی قطع کردن قسمتی از گروه شمع‌ها که محل عبور تونل‌زنی بود پرداخته شده است از نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شمع‌های واقع شده در بین تونل‌ها مقادیر نشست کمتری را نسبت شمع‌های برش خورده دارند. همینطور منطقه تاثیرگذار سه بعدی را برای جهت عرضی  $\pm 5D$  با توجه به محور بین تونل‌ها و قطر تونل و در جهت

1 Yoo

2 New Austrian Tunneling Method (NATM)

3 Müller

4 Rabcewicz

5 Pedro

طولی  $\pm 1D$  شناسایی شده است. در مطالعه پدرو و همکارانش به اهمیت کالیبراسیون اولیه ظرفیت نهایی شمع پرداخته شده و اعلام شده این مهم برای ارزیابی مناسب برای اندرکنش بین شمع‌ها و تونل‌ها بسیار تاثیرگذار است. لو و همکارانش<sup>6</sup> [31] با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ اقدام به ساخت گروه شمعی در مجاورت یک تونل دو قلوه کردند. لو و همکارانش بر روی نیروی محوری تغییر کرده بر روی گروه شمع مطالعه کردند. پی از اتمام حفاری تونل، بار محوری تحمل شده در نوک شمع به میزان ۲۲ درصد افزایش می‌یابد در صورتی که برای تونل زدن در نزدیکی سطح شمع ۲۱٫۷ درصد کاهش یافته است. نشست اندازگیری شده توسط دو شمع مدفون ناشی از تونل دوقلو با عمق هر تونل نسبت به شمع ارتباطی نزدیک دارد. برای تونل زنی دوقلو در نزدیکی نوک شمع، اختلاف ناچیزی در نشست شمع‌های مدفون به دلیل تونل زنی اول و دوم مشاهده شد. اگرچه این مطالعات ساز و کار اصلی حاکم بر تاثیر تونل سازی در منطقه شمع‌های موجود را شناسایی کرده‌اند، اما اکثر آن‌ها بر شرایط تونل سازی ایده‌آل یا تقریب کرنش صفحه ساده و بر نشست‌های زمین و حفاری تونل بر تک شمع متمرکز شده‌اند. بنابراین نیاز اساسی به مطالعه عمیق تری از اثرات بالقوه چنین عملیاتی وجود دارد. در این مقاله، نتایج حاصل از تحلیل عددی سه‌بعدی اثر حفاری تونل به روش جدید اتریسی با تمرکز بر محل حضور تونل‌زنی نسبت به گروه شمع‌ها در ابعاد مختلف بر نشست و تغییرات نیروی محوری گروه شمع‌هایی که مرتبط به یک پل هوایی با بار حمل و نقل می‌باشد.

## ۲- تحلیل المان محدود سه‌بعدی

در مطالعه حاضر، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس<sup>۷</sup> [27] در ساخت مدل‌های سه‌بعدی استفاده شده است.

در ساخت این مدل، زمین، شمع‌ها و شاتکریت با استفاده از المان خطی هشت گره‌ای<sup>۸</sup> و ده‌گره‌ای<sup>۹</sup> در شبیه سازی عددی استفاده شدند، مرزهای مدل در فواصل مشخص از سازه‌های زیرزمینی برای جلوگیری از اثرات مرز یعنی در فواصل  $5D$  و  $8D$  تعیین شده است. برای این منظور، ابعاد مدل کمی بزرگتر نیز در نظر گرفته شده‌اند. از نظر شرایط مرزی جابجایی نیز، مرزهای غلظتی روی سطح‌های عمودی مش، یعنی  $U_x=0$  و یا  $U_y=0$  در نظر گرفته شده‌اند. در قسمت تحتانی مدل نیز با توجه به لایه صلب شرایط مرزی بصورت گیردار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که اجزای مختلف پل اعم از پایه پل و کلاهدک گروه شمع‌ها با استفاده از در نظر گرفتن اندرکنش مربوط به این دو در نظر گرفته شده است. همینطور بار استاتیکی حمل و نقل نیز به تمامی پایه‌های پل اعمال شده است.

با توجه به مدل مشخصه که این مقادیر از یک پرونده طراحی سایت مترو سئول گرفته شده [۲۸] و دارای مقادیر RMR از ۴۰ تا ۶۰ است. همانطور که در جدول ۱ مشخص شده که اثر آب زیرزمینی در این تحقیق در نظر گرفته نشده است. لایه‌های خاک و سنگ فرض شده به عنوان یک ماده الاستوپلاستیک مطابق با معیار شکست مور-کولمب، پیشنهاد شده توسط دیویس<sup>۱۰</sup> [29] فرض شده است، در حالی که پوشش بتنی شاتکریت، شمع‌ها، کلاهدک‌های شمع، و پایه‌ها به صورت رفتار خطی الاستیک خطی فرض شدند. از مدل اصطکاک برای مدل‌سازی رفتار اندرکنش شمع و خاک، با فرض ضریب اصطکاک ۰/۷ استفاده شده است.

جدول ۱: شرایط ژئوتکنیکی موجود

نوع زمین	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$C'$ (KPa)	$\phi'$ (°)	$E$ (MPa)	$k_0$	$\theta$
خاک گرانیت تجزیه شده	21	20	33	60	.05	0.3
سنگ گرانیت آب و هوا	25	50	45	200	0.5	0.25
سنگ گرانیت جامد	25	450	45	1000	1	0.25

پس از سرهم کردن مدل، ابتدا شرایط تنش اولیه زمین را اعمال شد و سپس شمع‌ها در مدل فعال می‌شوند. در گام بعدی بار استاتیکی حمل و نقل نیز به سرستون‌ها اعمال می‌شود. در نهایت فرآیند تونل‌زنی که از مراحل حفاری و نصب پوشش بتنی شاتکریت می‌باشد به این صورت که ابتدا دو متر حفاری شده و دو متر قبلی حائل نصب می‌گردند. کل این فرآیند متشکل شده از ۴۰ مرحله بوده که

<sup>6</sup> Lu

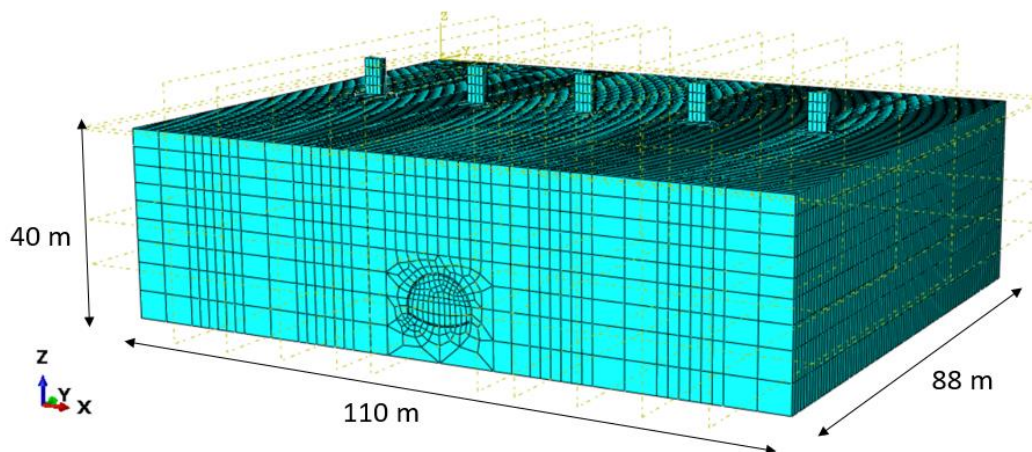
<sup>7</sup> ABAQUS

<sup>8</sup> C3D8R

<sup>9</sup> C3D10R

<sup>10</sup> Davis

جمعا طول این تونل زنی به ۸۰ متر می‌رسد. شکل ۲ الگوی شماره ۱ را که ابعاد آن و نحوه مش‌بندی در آن مشخص شده است جهت نمونه نیز ارائه شده می‌شود. همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است سعی شده که مش‌بندی در مکانهایی که تمرکز تنش بیشتر بوده ریزتر اعمال شود.



شکل ۱: نمونه مش‌بندی سه‌بعدی المان محدود

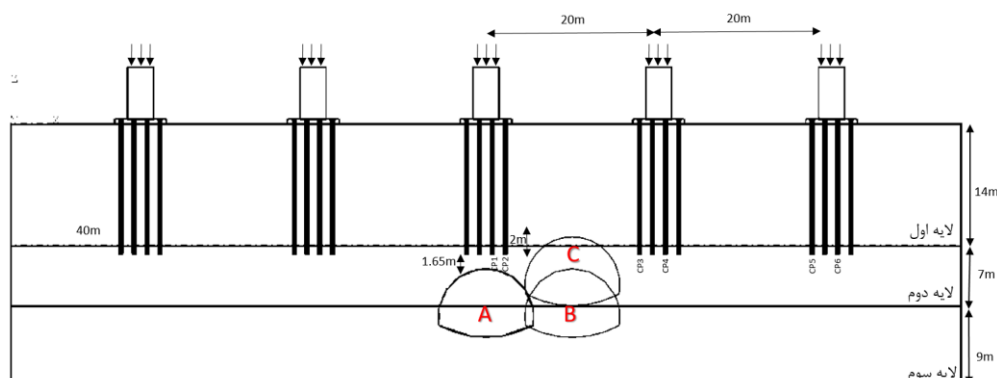
## ۲-۱- مطالعه پارامتریک

در این مطالعه به بررسی محل تونل‌زنی با دقت بر روی جنس شمع و ابعاد تونل پرداخته شده است. جنس شمع‌ها در این مطالعه با دو جنس بتنی و فولادی مطابق با مشخصات جدول ۲ انتخاب شده است.

جدول ۲: خصوصیات مصالح مربوط به گروه شمع‌ها

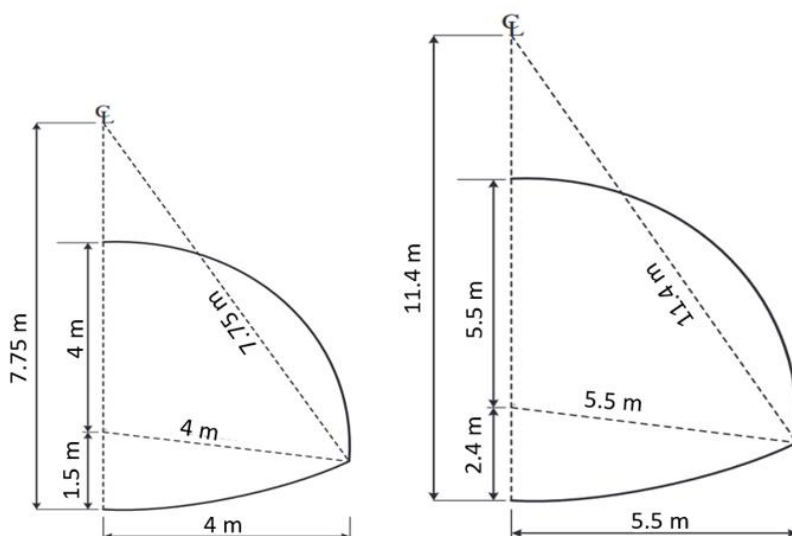
$\theta$	$E$ (GPa)	$\gamma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	جنس شمع
۰/۱۵	21	2400	بتنی
۰/۳	200	7850	فولادی

محل حفاری تونل مطابق با شکل ۲ انتخاب شده است. سعی شده محل‌های حفاری بطوری انتخاب شوند که محل بحرانی باشند و در نهایت بهترین محل برای انتخاب فرآیند تونل‌زنی انتخاب شود.



شکل ۲: محل احداث تونل‌زنی نسبت به نوک شمع

ابعاد تونل نیز مطابق با شکل ۳ برای بررسی اثرات ابعاد تونل بر روی میزان نیروی محوری شمع‌ها و نشست سطحی زمین نیز انتخاب شده است.



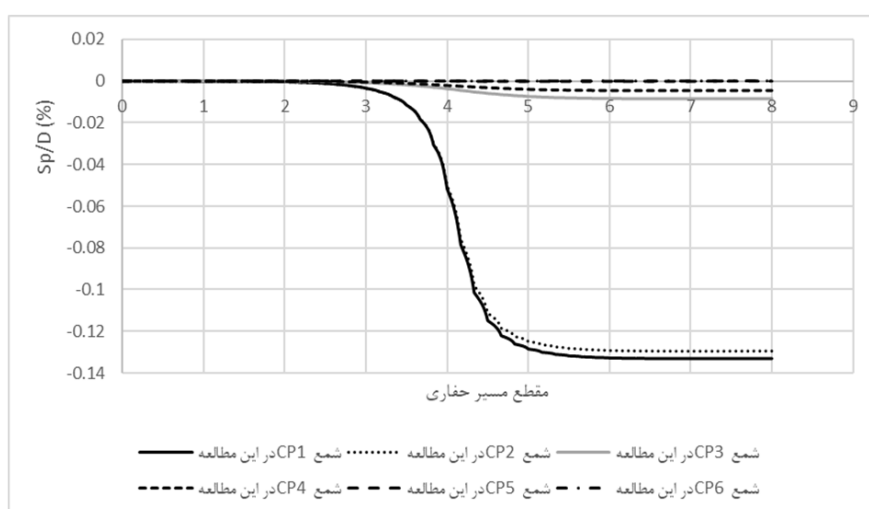
شکل ۳: نمونه ابعاد تونل استفاده شده در مدل سازی

### ۳- نتایج و بحث

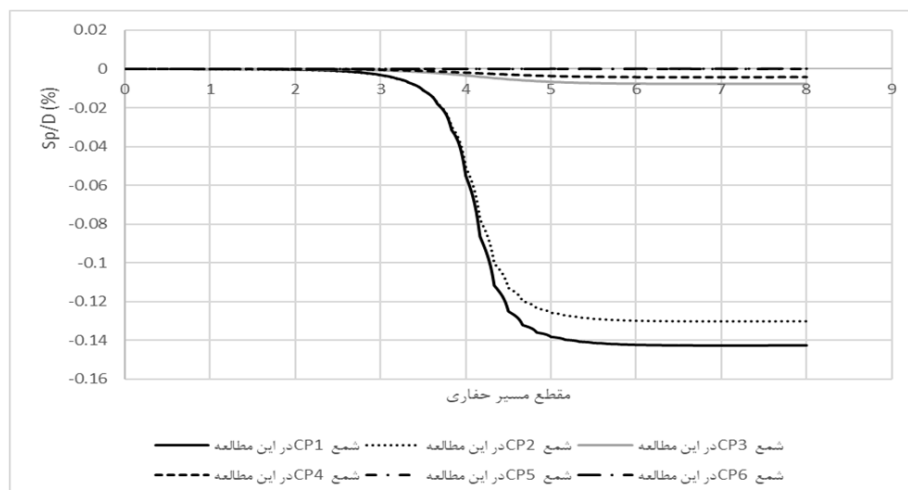
تونل زدن در مجاورت گروه شمع‌ها باعث ایجاد حرکات جانبی در شمع‌ها می‌شود که می‌تواند باعث ایجاد بارهای محوری و مماس خمشی در شمع‌ها شود. نتایج حاصل از مدلسازی از نظر تغییرات حرکت تونل‌زنی در نشست نوک شمع‌ها، نشست‌های سطحی زمین و تغییر بارهای محوری ناشی از حفاری تونل مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت به پاسخ‌های شمع به حفاری تونل پرداخته شده و نتایج ارائه شده است.

#### ۳-۱- نشست‌های نوک شمع

در این قسمت در شکل‌های ۵،۴ و ۶ که مربوط به شمع‌های فولادی و بتنی در تونلی با قطر ۱۱ و ۸ متری است که مربوط به سناریو A می‌باشد. با توجه به پیشرفت تدریجی تونل نشست‌های نوک شمع برای شمع‌های CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 و CP6 نشان داده شده است.



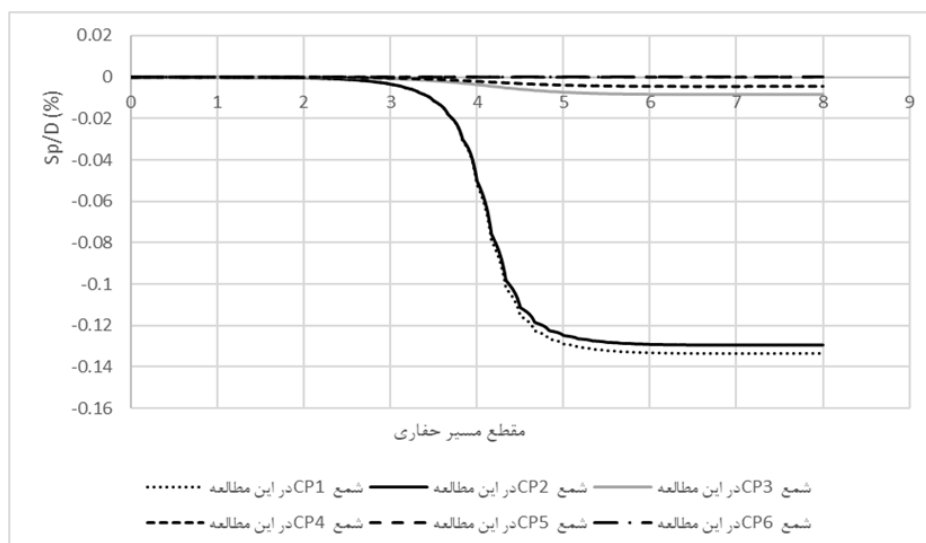
شکل ۴: خروجی نشست در طول تونل‌زنی مربوط به ۶ شمع فولادی در سه گروه شمع



شکل ۵: خروجی نشست در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع بتنی در سه گروه شمع

با توجه به شکل های ۴ و ۵ مشاهده می شود که هرچه محل تونل زنی در نزدیکی شمع ها باشد میزان نشست نوک شمع بتنی که در نزدیکی محل تونل زنی قرار دارند برابر  $0.152\%$  قطر تونل و میزان نشست فولادی برابر  $0.143\%$  قطر شمع می باشد. نکته حائز اهمیت در این نمودارها این است که در گروه شمع هایی با فواصل ۲۰ و ۴۰ متری میزان نشست نوک شمع در هر دو نوع جنس شمع در حدود  $0.085\%$  قطر تونل داشته که قابل نظر کردن است.

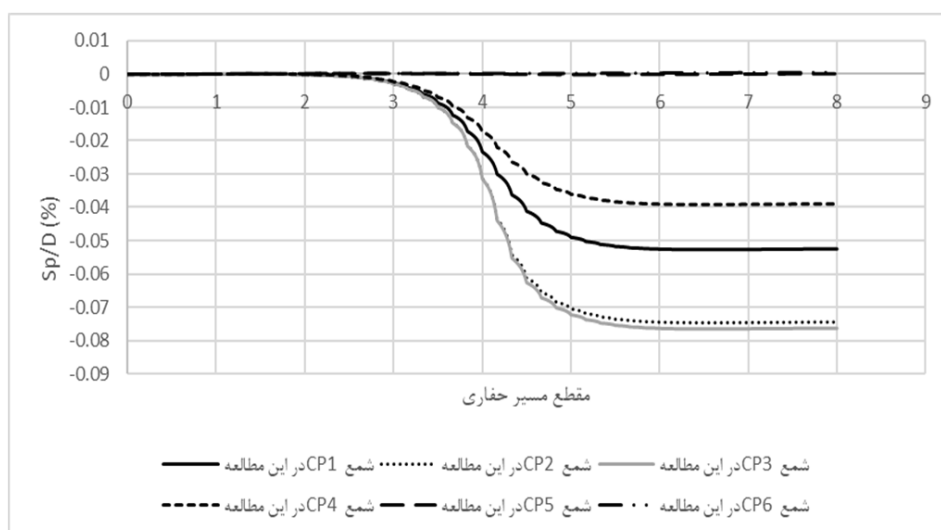
شکل ۶ میزان نشست های نوک شمع مربوط به شمع های فولادی که مربوط به تونلی با قطر ۸ متری در سناریو A می باشند مطابق زیر می باشد.



شکل ۶: خروجی نشست در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع فولادی در سه گروه شمع

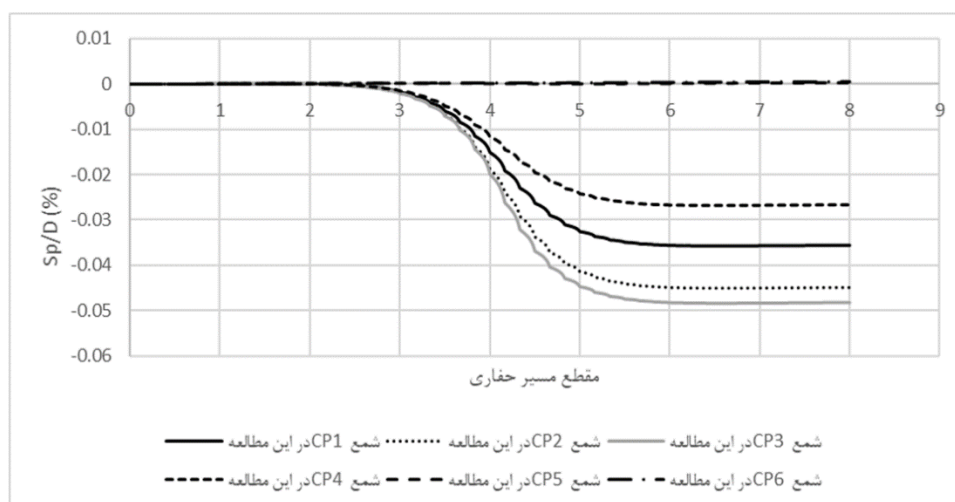
برای شمع CP1 که در شکل ۶ قابل مشاهده است، بدلیل اینکه این شمع درست در بالای محل تونل زنی می باشد بیشترین نشست را در حدود  $0.146\%$  قطر تونل تجربه می کند. چنین روشی نشان می دهد که هر شمع محافظت نشده ای که به طور مستقیم در بالای تونل قرار می گیرد می تواند  $60\%$  از کل نشست خود را قبل از تکمیل تونل تجربه کند. با مشاهده به شمع های CP4 و CP6 مشاهده می شود که کمترین میزان نشست را در حدود  $0.08\%$  قطر تونل دارند. بنظر می آید که علت این مقدار نشست از شمع، فاصله جانبی ۲۰ و ۴۰ متری نسبت به محل تونل زنی می باشد

در این قسمت در شکل‌های ۷ و ۸ که مربوط به شمع‌های فولادی و بتنی در تونلی با قطر ۱۱ و ۸ متری که مربوط به سناریو B می‌باشد. باتوجه به پیشرفت تدریجی تونل نشست‌های نوک شمع برای شمع‌های CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 و CP6 نشان داده شده است.



شکل ۷: خروجی نشست در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع در سه گروه شمع در تونلی با قطر ۱۱ متری

باتوجه به شکل ۷ برای شمع‌های CP2 و CP3 بدلیل اینکه تونل در بین گروه شمع‌ها می‌باشد بیشترین نشست را در حدود ۰/۰۵۶٪ قطر تونل تجربه می‌کند. با مشاهده به شمع‌های CP5 و CP6 بوده مشاهده می‌شود که کمترین میزان نشست را در حدود ۰/۰۰۹٪ قطر تونل دارند. بنظر می‌آید که علت این مقدار نشست از شمع، فاصله جانبی ۲۰ و ۴۰ متری نسبت به محل تونل زنی می‌باشد.

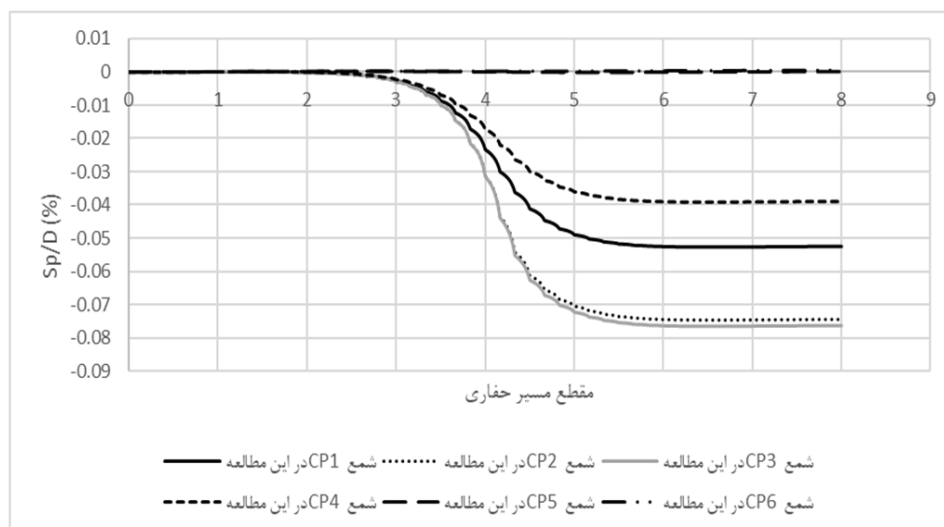


شکل ۸: خروجی نشست در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع در سه گروه شمع در تونلی با قطر ۸ متری

باتوجه به شکل ۸ برای شمع‌های CP2 و CP3 بدلیل اینکه تونل در بین گروه شمع‌ها می‌باشد بیشترین نشست را در حدود ۰/۰۵۵٪ قطر تونل تجربه می‌کند. با مشاهده به شمع‌های CP5 و CP6 بوده مشاهده می‌شود که کمترین میزان نشست را در حدود ۰/۰۱۱٪ قطر تونل دارند. بنظر می‌آید که علت این مقدار نشست از شمع، فاصله جانبی ۲۰ و ۴۰ متری نسبت به محل تونل زنی می‌باشد.

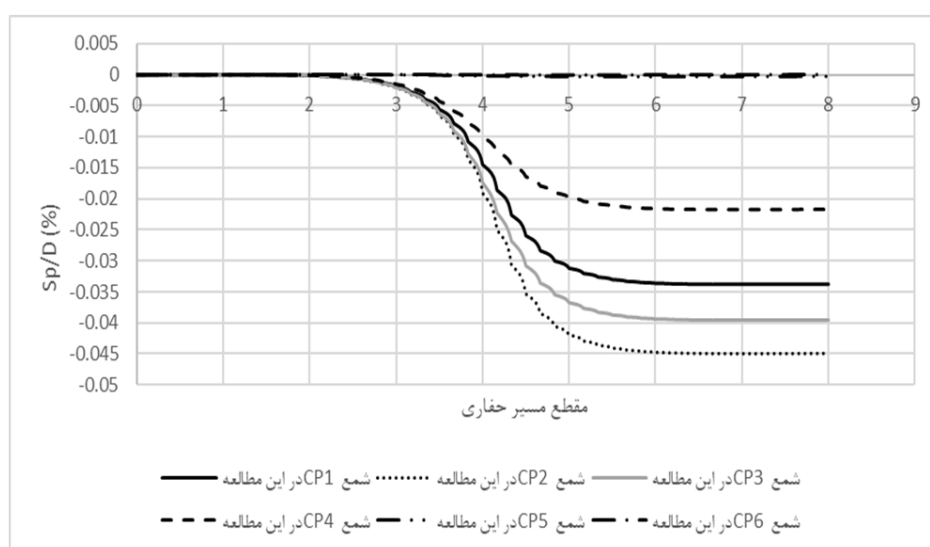
در این قسمت در اشکال ۹ و ۱۰ که مربوط به شمع‌های فولادی و بتنی در تونلی با قطر ۱۱ و ۸ متری که مربوط به سناریو C می‌باشد. باتوجه به پیشرفت تدریجی تونل نشست‌های نوک شمع برای شمع‌های CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 و CP6 نشان می‌دهد.





شکل ۹: خروجی نشست در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع در سه گروه شمع در تونلی با قطر ۱۱ متری

باتوجه به شکل ۹ که مربوط به سناریو C میباشد، برای شمع های CP2 و CP3 بدلیل اینکه تونل در بین شمع ها میباشد بیشترین نشست را در حدود ۰/۰۰۹٪ قطر تونل تجربه می کند. با مشاهده به شمع های CP5 و CP6 بوده مشاهده می شود که کمترین میزان نشست را در حدود ۰/۰۰۶۸٪ قطر تونل دارند.

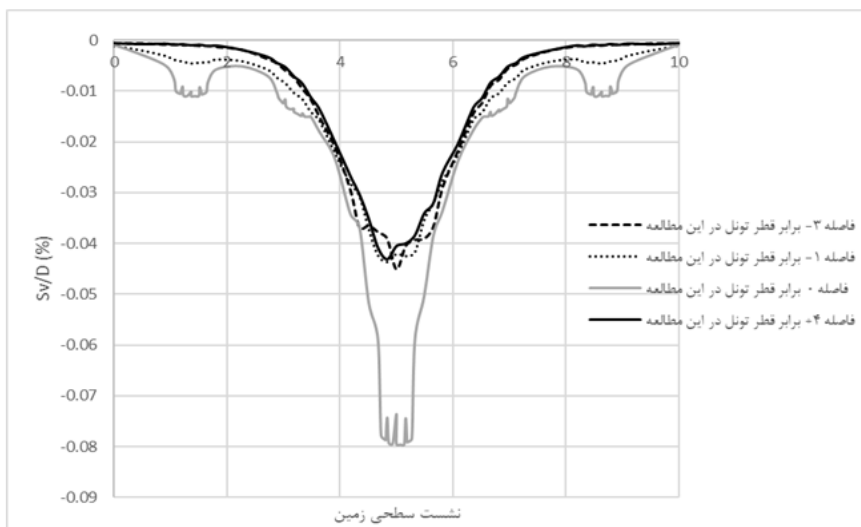


شکل ۱۰: خروجی نشست در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع در سه گروه شمع در تونلی با قطر ۸ متری

باتوجه به شکل ۱۰ که مربوط به سناریو C میباشد، شمع های CP2 و CP3 بدلیل اینکه تونل در بین شمع ها میباشد بیشترین نشست را در حدود ۰/۰۵۸٪ قطر تونل تجربه می کند. با مشاهده به شمع های CP5 و CP6 بوده مشاهده می شود که کمترین میزان نشست را در حدود ۰/۰۰۹٪ قطر تونل دارند.

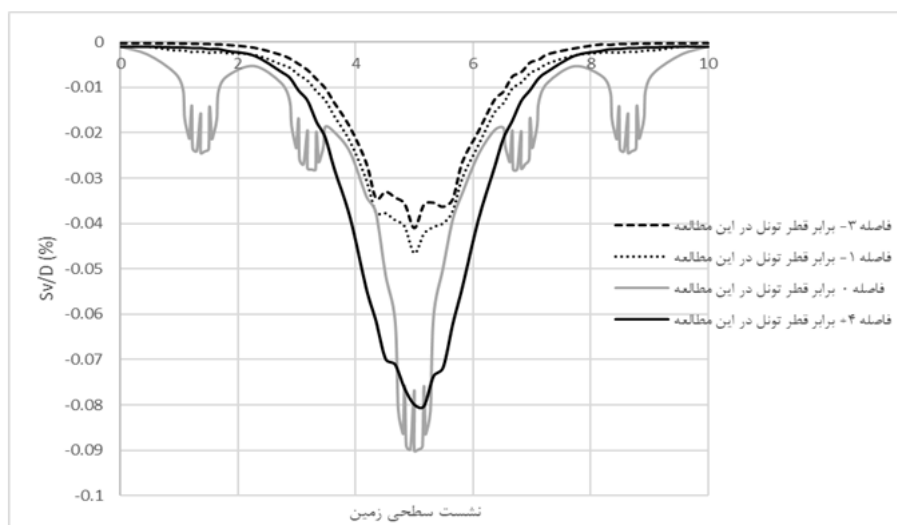
#### ۴- نشست های سطحی زمین

در این قسمت در شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ که مربوط به شمع های فولادی و بتنی در تونلی با قطر ۱۱ و ۸ متری بوده که مربوط به سناریو A می باشد. این خروجی ها در فواصل معینی و باتوجه به پیشرفت تدریجی تونل، نشست های سطحی زمین به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱۱: خروجی نشست سطحی زمین در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع فولادی در سه گروه شمع برای تونل ۱۱ متری

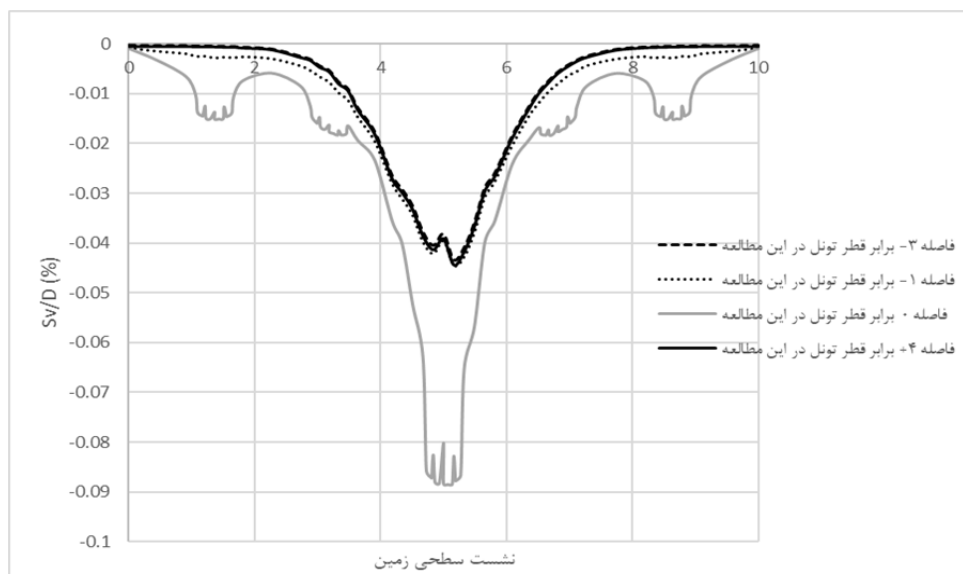
همانطور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، میزان نشست سطحی زمین از ۳۳ متر قبل از تونل زنی تا نقطه حضور گروه شمع تا ۴۴ متر پس از عبور تونل زنی از نقطه حضور گروه شمع را نشان می‌دهد. این نمودار نشان دهنده حداکثر نشست سطح زمین در محل گروه شمع به میزان ۸/۷ میلی‌متر (۰/۰۷۹٪ قطر تونل) و حداقل نشست ۴/۹۶ میلی‌متر (۰/۰۴۵٪ قطر تونل) ۳۳ متر قبل از رسیدن فرایند تونل زنی به محل گروه شمع می‌باشد.



شکل ۱۲: خروجی نشست سطحی زمین در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع بتنی در سه گروه شمع برای تونل ۱۱ متری

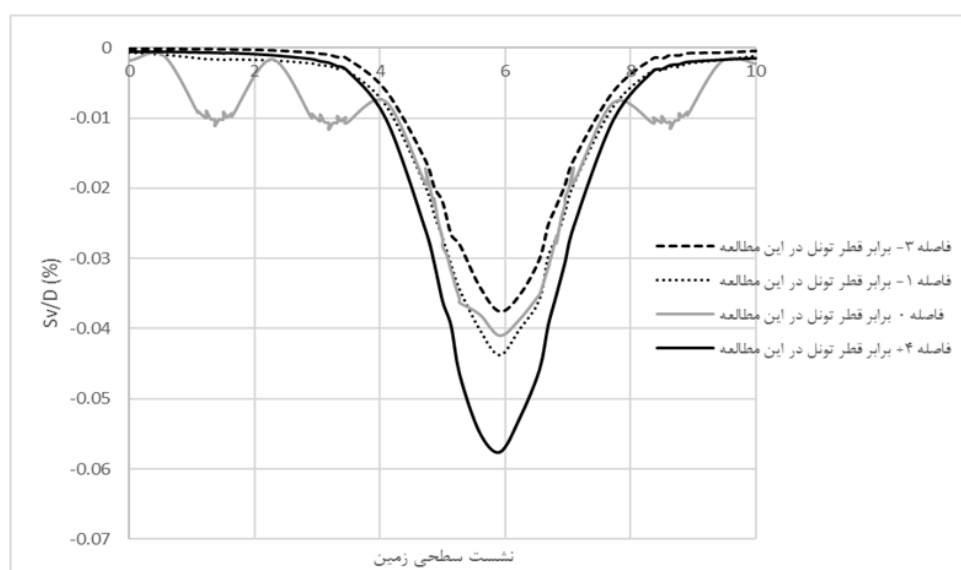
شکل ۱۲، نشست سطح زمین از ۳۳ متر قبل از تونل زنی تا نقطه حضور گروه شمع تا ۴۴ متر پس از عبور تونل زنی از نقطه حضور گروه شمع را نشان می‌دهد. این نمودار نشان دهنده حداکثر نشست سطح زمین در محل گروه شمع به میزان ۹/۹ میلی‌متر (۰/۰۹٪ قطر تونل) و حداقل نشست ۳/۸ میلی‌متر (۰/۰۳۵٪ قطر تونل) ۳۳ متر قبل از رسیدن فرایند تونل زنی به محل گروه شمع می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۳، نشست سطحی در فاصله ۲۴ متری قبل از محل گروه شمع‌ها حداکثر نشست برابرست با ۳/۳ میلی‌متر (۰/۰۴۳٪ قطر تونل) و حداکثر نشست سطح زمین که دقیقاً در حضور گروه شمع صورت می‌گیرد برابر با ۷/۰۳ میلی‌متر (۰/۰۸٪ قطر تونل) می‌باشد.



شکل ۱۳: خروجی نشست سطحی زمین در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع فولادی در سه گروه شمع برای تونل ۸ متری

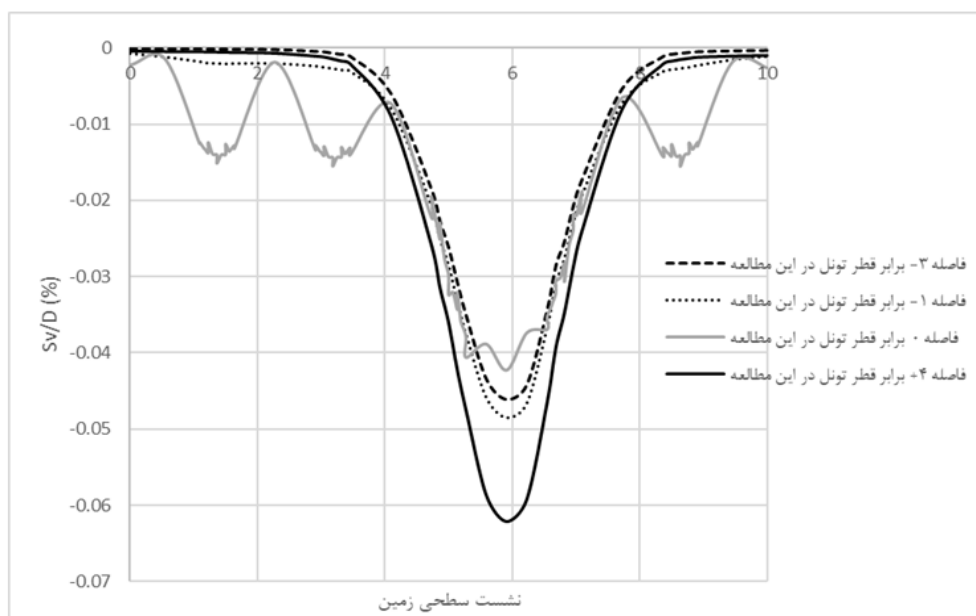
در این قسمت در شکل های ۱۴ و ۱۵ که مربوط به شمع های فولادی در تونلی با قطر ۱۱ و ۸ متری بوده که مربوط به سناریو B می باشد. این خروجی ها در فواصل معینی و با توجه به پیشرفت تدریجی تونل نشست های سطحی زمین به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱۴: خروجی نشست سطحی زمین در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع فولادی در سه گروه شمع برای تونل ۱۱ متری برای سناریو B

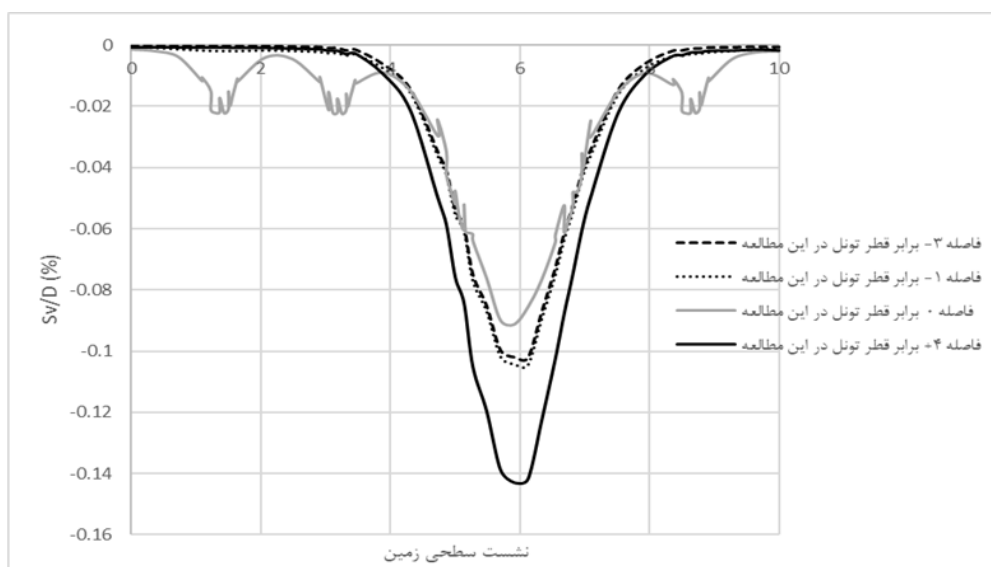
نشست سطحی در فاصله ۳۳ متری قبل از محل گروه شمع ها حداکثر نشست برابرست با ۴/۱ میلی متر (۰/۰۳۷٪ قطر تونل) و حداکثر نشست سطح زمین که دقیقا در حضور گروه شمع صورت میگیرد برابر با ۶/۳ میلی متر (۰/۰۵۷٪ قطر تونل) می باشد.

نشست سطحی در فاصله ۲۴ متری قبل از محل گروه شمع ها حداکثر نشست برابرست با ۳/۳ میلی متر (۰/۰۴۲٪ قطر تونل) و حداکثر نشست سطح زمین که دقیقا در حضور گروه شمع صورت میگیرد برابر با ۵ میلی متر (۰/۰۶۲٪ قطر تونل) می باشد.



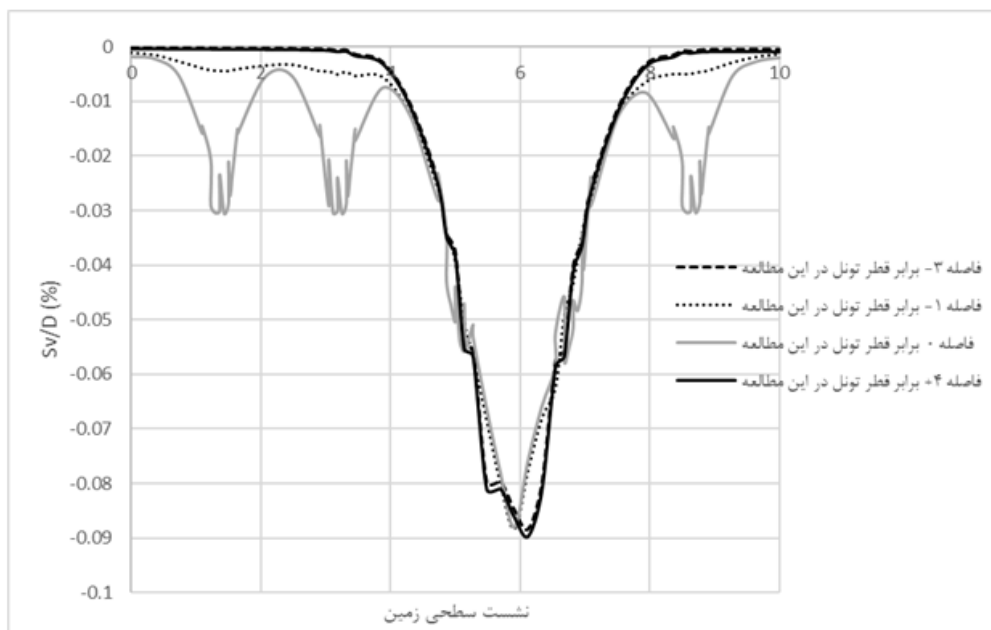
شکل ۱۵: خروجی نشست سطحی زمین در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع فولادی در سه گروه شمع برای تونل ۸ متری برای سناریو B

در این قسمت در اشکال ۱۶ و ۱۷ که مربوط به شمع‌های فولادی در تونلی با قطر ۱۱ و ۸ متری هستند که مربوط به سناریو C می‌باشد. این خروجی‌ها در فواصل معینی و باتوجه به پیشرفت تدریجی تونل نشست‌های سطحی زمین به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱۶: خروجی نشست سطحی زمین در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع فولادی در سه گروه شمع برای تونل ۱۱ متری برای سناریو C

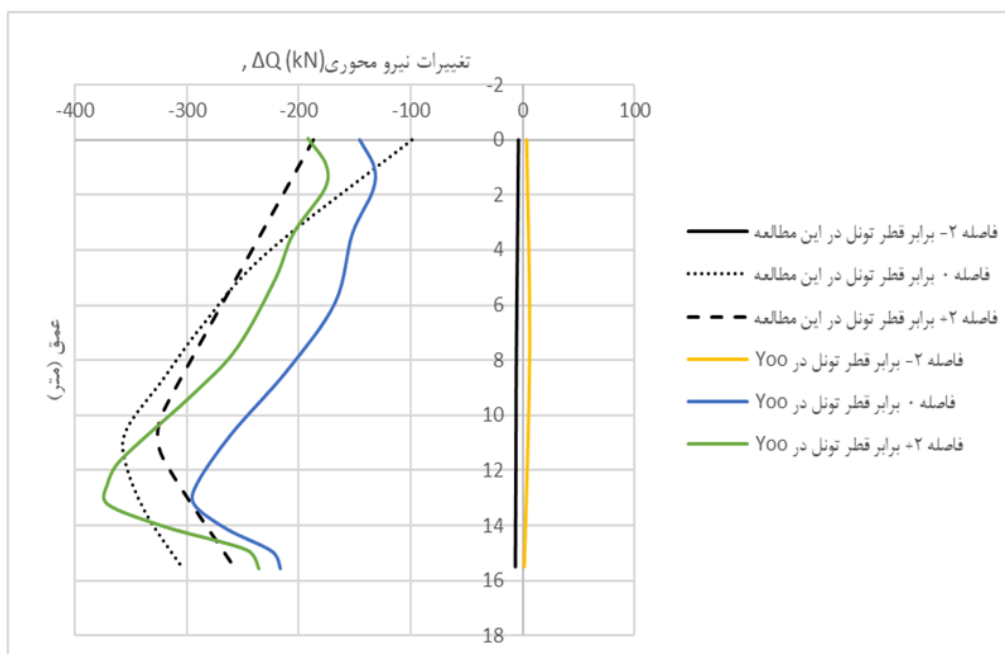
نشست سطحی در فاصله ۳۳ متری قبل از محل گروه شمع‌ها حداکثر نشست برابرست با ۸/۴ میلی‌متر (۰/۰۷۶٪ قطر تونل) با حداکثر نشست سطح زمین که دقیقاً در حضور گروه شمع صورت می‌گیرد برابر با ۱۵/۷ میلی‌متر (۰/۱۴۳٪ قطر تونل) می‌باشد. نشست سطحی در فاصله ۲۴ متری قبل از محل گروه شمع‌ها حداکثر نشست برابرست با ۶/۴ میلی‌متر (۰/۰۸۰۱٪ قطر تونل) و حداکثر نشست سطح زمین که دقیقاً در حضور گروه شمع صورت می‌گیرد برابرست با ۷/۱۷ میلی‌متر (۰/۰۸۹۷٪ قطر تونل).



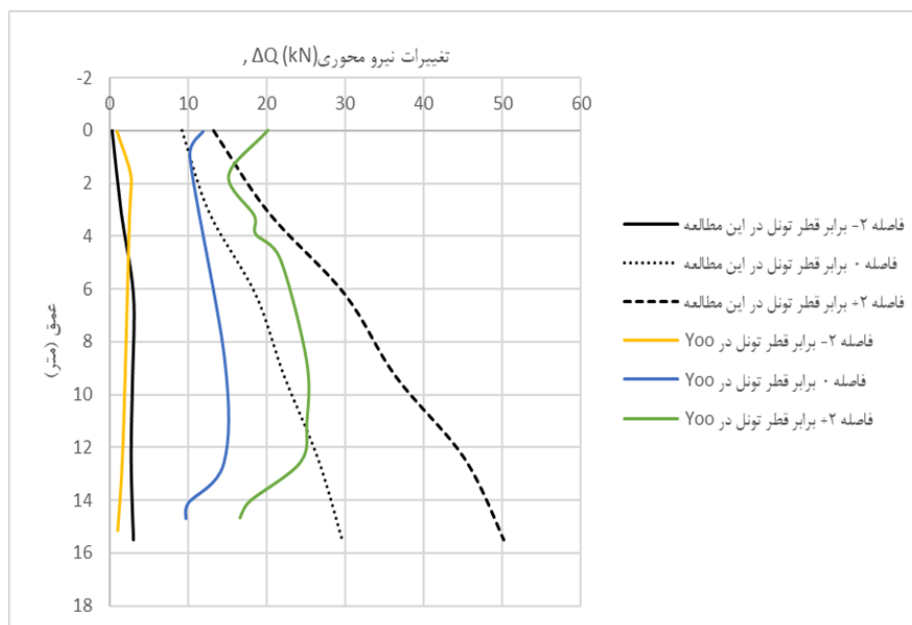
شکل ۱۷: خروجی نشست سطحی زمین در طول تونل زنی مربوط به ۶ شمع فولادی در سه گروه شمع برای تونل ۸ متری برای سناریو C

## ۵- تغییرات نیرو محوری در شمع‌ها

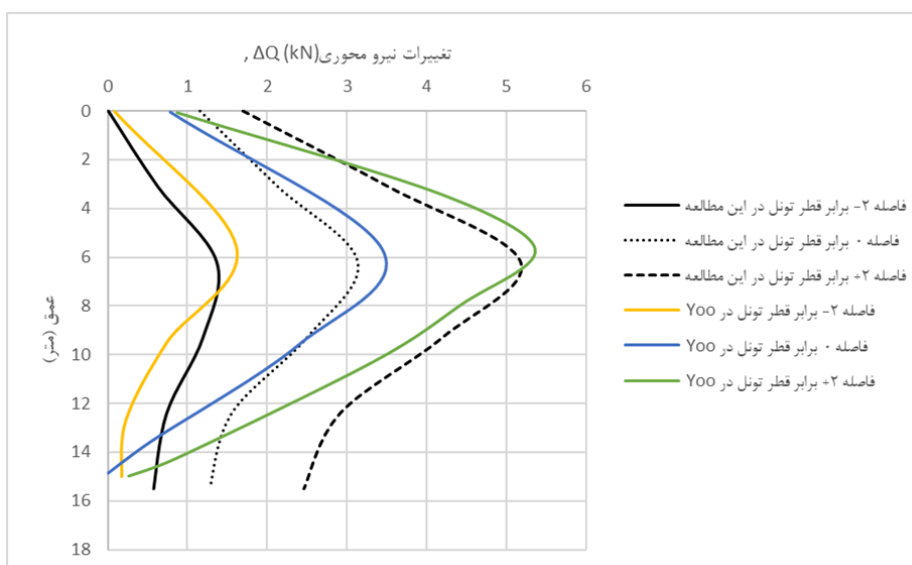
در این قسمت در اشکال ۱۹، ۱۸ و ۲۰ که مربوط به شمع‌ها در تونلی با قطر ۱۱ متری هستند که مربوط به سناریو A می‌باشد. این خروجی‌ها در فواصل معینی و باتوجه به پیشرفت تدریجی تونل نیرو محوری‌ها به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱۸: تغییرات بار طول شمع CPI در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف



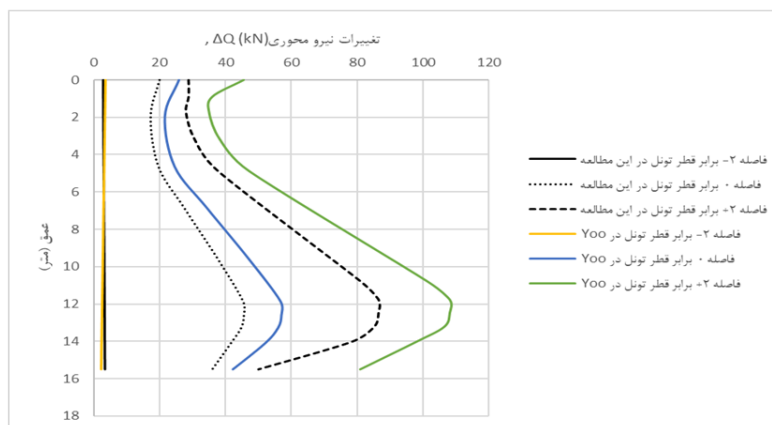
شکل ۱۹: تغییرات بار طول شمع CP4 در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف



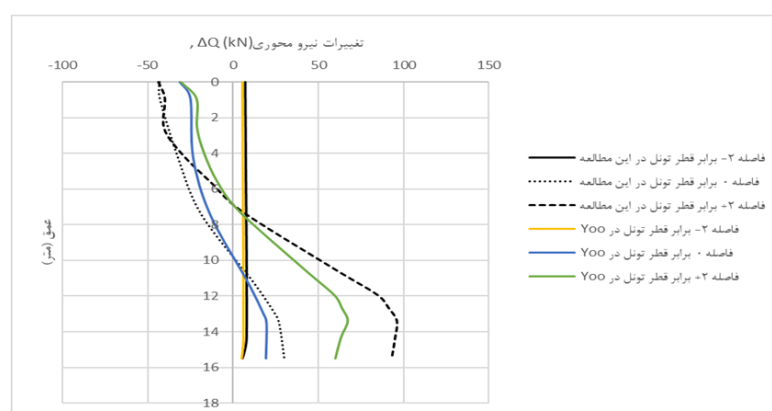
شکل ۲۰: تغییرات بار طول شمع CP6 در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف

همانطور که بنظر می‌آید شمع‌هایی که دقیقاً در بالای محل تونل‌زنی قرار دارند یعنی CP1 بیشترین کاهش بار در نوک شمع را تجربه می‌کنند. این مقدار از کاهش بار همانطور که در شکل 18 قابل مشاهده است به عدد ۳۵۰ کیلو نیوتن رسیده است. همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود هرچه قدر شمع‌ها از محل تونل‌زنی فاصله دارند، میزان تغییرات بار در نوک شمع‌ها که مقداری کمتر از ۵۰ کیلو نیوتن را تجربه می‌کنند. همچنین شمع‌هایی که دورتر هستند (اشکال ۱۹ و ۲۰) تمایل به افزایش بار را دارند. همانطور که در شکل فوق قابل مشاهده است در فاصله ۲ برابری قطر تونل تغییرات بار در شمع CP6 و CP4 شروع به افزایش داشته است. برای شمع‌های CP4 و CP6 بدلیل اینکه در فاصله ۲۰ و ۴۰ متری از محل حضور شمع‌ها در مجاورت تونل‌زنی قرار دارند کاهش بار در طول شمع بسیار ناچیز است.

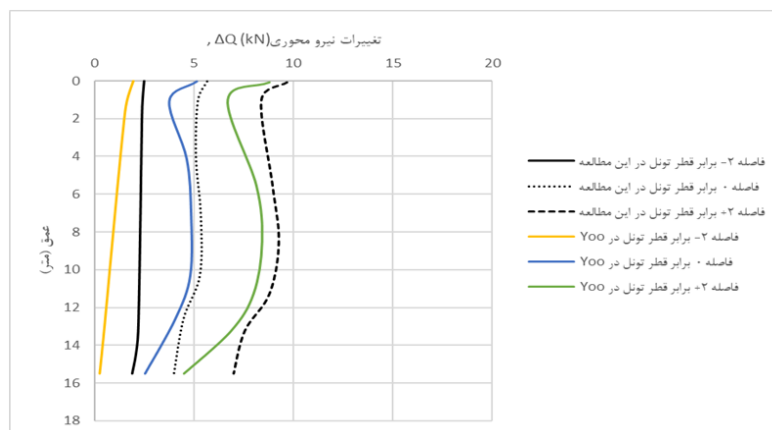
در ادامه به بررسی نیروهای محوری موجود در شمع‌ها در حضور تونلی با قطر ۱۱ متری که در سناریوی B بوده می‌پردازیم.



شکل ۲۱: تغییرات بار طول شمع CP3 در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف



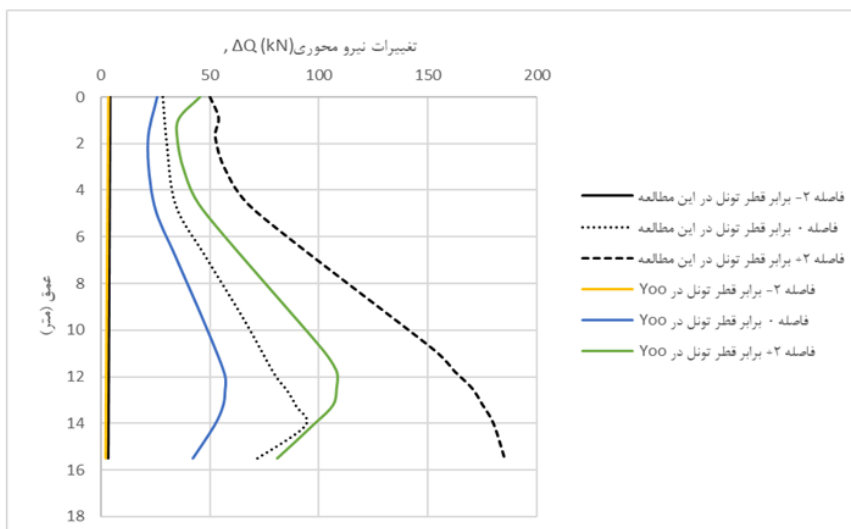
شکل ۲۲: تغییرات بار طول شمع CP4 در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف



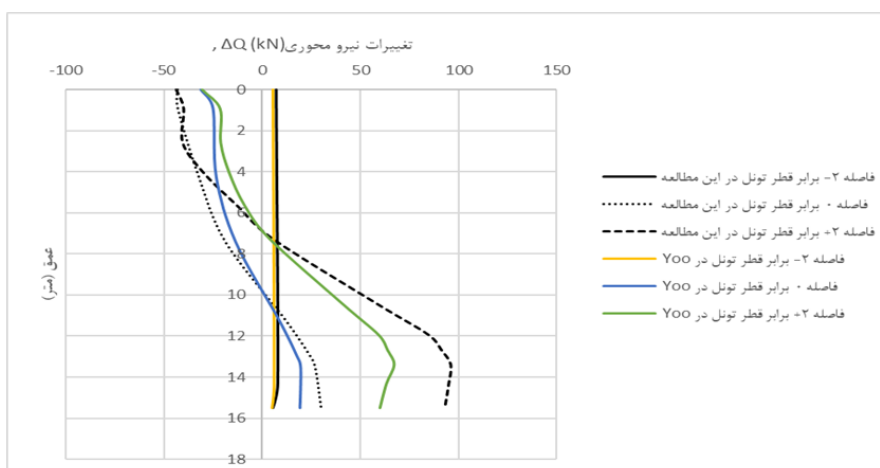
شکل ۲۳: تغییرات بار طول شمع CP5 در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف

در اشکال ۲۱ تا ۲۳، همانطور که بنظر می آید بدلیل اینکه فرایند تونل زنی با فاصله جانبی از گروه شمع‌ها وجود دارد کاهش بار چشمگیری نداریم.

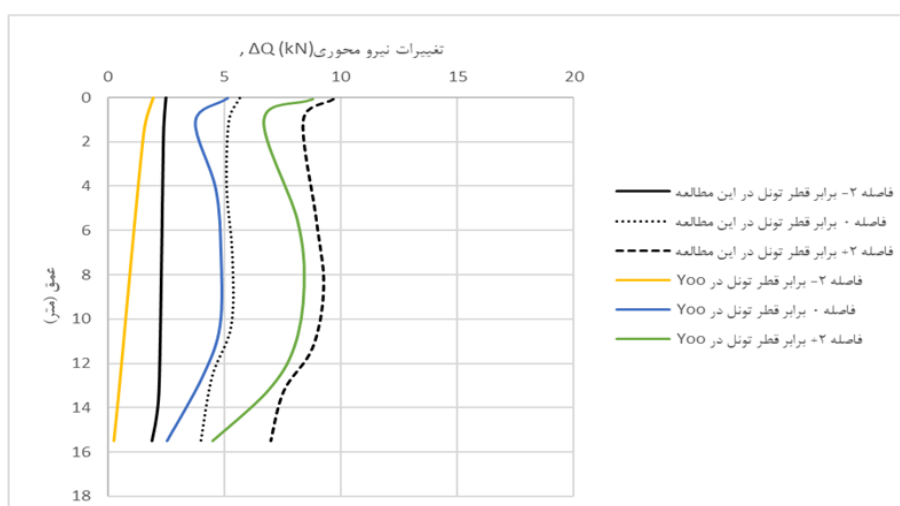
در ادامه به بررسی نیروهای محوری موجود در شمع‌ها در حضور تونلی با قطر ۱۱ متری که در سناریوی C بوده می پردازیم.



شکل ۲۴: تغییرات بار طول شمع CP3 در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف



شکل ۲۵: تغییرات بار طول شمع CP4 در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف



شکل ۲۶: تغییرات بار طول شمع CP5 در حین پیشروی تونل در فواصل مختلف



## ۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از تحلیل سه بعدی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، اثر محل احداث حفاری تونل به روش جدید اتریشی با قطرهای مختلف و اثرات جنس گروه شمع‌های موجود بر میزان نشست سطحی زمین، نشست‌های نوک شمع‌ها و نیروهای وارد بر گروه شمع زمانی که تونل در مجاورت شمعها قرار دارد مطابق ذیل ارائه می‌گردد.

۱- با توجه به بررسی نمودارهای نشست نوک شمع‌ها فارغ از جنس و مقطع گروه شمع‌ها ۶۰ درصد از کل نشست شمع‌ها که در بالای محل تونل قرار دارند در فاصله ی 1 D- شمع‌ها اتفاق می‌افتد. برای جلوگیری از نشست‌های ناگهانی و بروز خرابی‌ها در حین تونل‌زنی دقت بیشتری در عملیات حفاری در فاصله 1 D- انجام پذیرد.

۲- با بررسی میزان نشست‌های نوک در شمع‌های بتنی و فولادی فارغ از تغییرات ایجاد شده در هندسه آن، میزان نشست‌های نوک شمع‌ها در شمع‌های بتنی مقداری بیشتر از شمع‌های فولادی بوده که قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

۳- در حفاری تونل در سناریو A، برای شمع‌هایی که در بالای محل تونل‌زنی قرار دارند، اما زمانی که هنوز به محل حضور شمعها نرسیده است از کاهش بار بسیار ناچیزی بهره می‌برند اما پس از رسیدن تونل به محل گروه شمع‌ها، کاهش بارها در شمع بصورت افزایشی رخ می‌دهد. اما گروه شمع‌هایی که فاصله آن‌ها از محل تونل‌زنی دورتر است، به میزان کمی دچار افزایش بار می‌شوند. که این میزان افزایش و کاهش کاملاً بسته به محل قرار گیری شمع‌ها نسبت به محل تونل‌زنی دارد.

۵- با کاهش ۳۷/۵ درصدی قطر تونل میزان نشست نوک شمع ۲۲٪ کاهش یافت. با توجه به تغییر شعاع هندسه تونل که باعث تغییر نشست‌های نوک شمع شد، ولی میزان درصد نشست نوک شمع نسبت به قطر تونل این نتیجه را نشان می‌دهد که هرچقدر قطر تونل در یک خاک مشخص تغییر کند، میزان نشست نوک شمع، درصد معینی از قطر تونل می‌باشد.

۶- با کاهش ۳۷/۵ درصدی قطر تونل میزان نشست سطحی زمین ۲۳/۷٪ یافت. با توجه به تغییر شعاع تونل که باعث تغییر نشست سطحی زمین شد، اما میزان درصد نشست سطحی زمین نسبت به قطر تونل دقیقاً در محل حضور گروه شمع‌ها این نتیجه را نشان می‌دهد که هرچقدر قطر تونل در یک خاک مشخص تغییر کند، میزان نشست سطح زمین درصد معینی از قطر تونل است.

۷- با بررسی نتایج تونل‌زنی در سناریوی B، با افزایش ۳۷/۵٪ درصدی قطر تونل، میزان نشست نوک شمع حداکثر ۲۹٪ افزایش و میزان نشست سطح زمین نیز، ۲۱٪ افزایش می‌یابد.

۸- با بررسی نتایج تونل‌زنی در در سناریوی C، با افزایش ۳۷/۵٪ درصدی قطر تونل، میزان نشست نوک شمع حداکثر ۴۸/۹٪ افزایش و میزان نشست سطح زمین نیز، ۵۴/۳٪ افزایش می‌یابد.

۹- با بررسی اثر محل احداث تونل‌زنی، با توجه به بررسی نشست‌های سطحی زمین، نشست نوک شمع و نیرومحوری‌ها بهترین منطقه برای احداث تونل بین دو گروه شمع و با فاصله مثبت از گروه شمع‌ها می‌باشد.

## مراجع

- [1] Nematollahi and Dias, (2019), Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction-Case of the Shiraz subway line, Tunnelling and Underground Space Technology, Page.75-88.
- [2] Yoo, C. (2009). Performance of multi-faced tunnelling-A 3D numerical investigation. Tunnelling and underground space technology, 24(5), Page 562-573.
- [3] Yoo, C. (2013). Interaction between tunneling and bridge foundation-A 3D numerical investigation. Computers and Geotechnics, 49, 70-78.
- [4] Mair, R., Taylor, R., Bracegirdle, A., (1993). Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. Geotechnique 43 (2).
- [6] Boonyarak, T., Phisitkul, K., Ng, C.W., Teparaksa, W., Aye, Z.Z., (2014). Observed ground and pile group responses due to tunneling in Bangkok stiff clay. Can. Geotech. J. 51 (5), 479-495.
- [7] Lee, Y.-J., Bassett, R.H., (2006). A model test and numerical investigation on the shear deformation patterns of deep wall-soil-tunnel interaction. Can. Geotech. J. 43 (12), 1306-1323.
- [8] Selemetas, D., Standing, J., Mair, R., (2006). The response of full-scale piles to tunnelling. Proceedings of the 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.

- [9] Ng, C.W.W., Lu, H., Peng, S., (2013). Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunnelling on an existing pile. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 35, 189–199.
- [10] Mroueh, H., Shahrour, I., (2002). Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 26 (3), 217–230.
- [11] Kitiyodom, P., Matsumoto, T., Kawaguchi, K., (2005). A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunnelling. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 29 (15), 1485–1507.
- [12] Liu, H., Small, J.C., Carter, J.P., (2008). Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 23 (4), 399–420.
- [13] Lee, C., (2012). Three-dimensional numerical analyses of the response of a single pile and pile groups to tunnelling in weak weathered rock. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 32, 132–142.
- [14] Jongpradist, P., Kaewsri, T., Sawatpanich, A., Suwansawat, S., Youwai, S., Kongkitkul, W., Sunitsakul, J., (2013). Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundations by numerical analyses. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 34, 96–109.
- [15] Benton, L.J., Phillips, A., (1991). The behavior of two tunnels beneath a building on piled foundation. Deformation of soils and displacements of structures. *Proc. 10th Eur. Conf. Soil Mech.*, Florence.
- [16] Chudleigh, I., Higgins, K.G., St John, H.D., Potts, D.M., Schroeder, F.C., (1999). Pile-tunnel interaction problems. *Proc. of Tunnel Construction and Piling*, London, Great Britain.
- [17] Chapman, T., Nicholson, D., Luby, D., (2001). Use of the observational method for the construction of piles next to tunnels. *Proc. Int. Conf. Response of Buildings to Excavation Induced Ground Movements*, London.
- [18] Schroeder, F.C., (2002). The influence of bored piles on existing tunnels: a case study. *Ground Eng.* 35 (7), 32–34.
- [19] Schroeder, F., Potts, D., Addenbrooke, T., (2004). The influence of pile group loading on existing tunnels. *Geotechnique* 54 (6), 351–362.
- [20] Lueprasert, P., Jongpradist, P., Suwansawat, S., (2017). Numerical investigation of tunnel deformation due to adjacent loaded pile and pile-soil-tunnel interaction. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 70, 166–181.
- [21] Yao, J., Taylor, R.N., McNamara, A.M., (2008). The effects of loaded bored piles on existing tunnels. In: *Geotech. Asp. Undergr. Constr. Soft Gr. – 6th Int. Symp.* pp. 735–741.
- [22] Lueprasert, P., Jongpradist, P., Charoenpak, K., Chaipanna, P., Suwansawat, S., (2015). Three dimensional finite element analysis for preliminary establishment of tunnel influence zone subject to pile loading. *Maejo Int. J. Sci. Technol.* 9, 209–223.
- [23] Lueprasert et al, (2017), “Tunnelling and Underground Space Technology” , “Numerical investigation of tunnel deformation due to adjacent loaded pile and pile-soil-tunnel interaction” , P.166-181.
- [24] Lee, Y.-J., Bassett, R.H., (2007). Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 22 (3), 325–342.
- [25] Müller L. Removing misconceptions on the New Austrian tunnelling method. *Tunn Tunnel* (1978);10(8):29–32.
- [26] Rabcewicz L. The new Austrian tunnelling method. Part one. *Water power* November. Part two, December 1964 and Part three, January (1965).
- [27] SIMULIA User Assistance 2019 Abaqus Inc.
- [28] Seoul Metro Contract 912 Design Report. Seoul Subway Construction Authority, Seoul, Korea; (2002).
- [29] Davis EH. Theories of plasticity and the failure of soil masses. *Soil mechanics: selected topics*. UK: Butterworth's London; (1968). p. 341–80.
- [۳۰] Pedro-Tomislav Simic-Silva , Belén Martínez-Bacas , Rubén Galindo-Airesa , Davor Simic. 3D simulation for tunnelling effects on existing piles. *Computers and Geotechnics*; (2020). p. 1–15.
- [۳۱] Hu Lu, Jiangwei Shi, Charles W.W. Ng, Yaru Lv. Three-dimensional centrifuge modeling of the influence of side-by-side twin tunneling on a piled raft. *Tunnelling and Underground Space Technology*; (2020). p. 1–10.