

امکان سنجی روش نوین تونل سازی کم عمق برای اجرای ایستگاه مترو در شرایط آبرفت تهران

پژوهشی

سینا امیری^۱؛ علی نقی دهقان^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، sina.amiri@srbiau.ac.ir
۲- استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، a.dehghan1984@srbiau.ac.ir

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹

شماره صفحات: ۲۲۹ تا ۲۵۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2020.9714.1395

چکیده	واژگان کلیدی
<p>این مقاله امکان سنجی روش نوین تونل سازی کم عمق (STM) را برای اجرای ایستگاه متروی آشناسان (Z6) واقع در قطعه شمالی خط ۶ متروی تهران در مقایسه با روش سنتی شمع و ریب (Pile and Rib) اجرا شده در این ایستگاه ارایه می کند. این مطالعه بر مبنای ارزیابی نشست سطح زمین به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D Tunnel انجام شده است. نتایج حاصل از مدل سازی عددی اجرای ایستگاه به روش شمع و ریب نشان داد که حداکثر نشست بدست آمده از این روش (۲۳/۶۵ میلی متر) مربوط به محور ایستگاه و در محدوده نشست مجاز (۳۰ میلی متر) قرار دارد. تطابق بسیار خوب نتایج حاصل از مدل سازی عددی و داده های ابزار دقیق، معرف تأیید و صحت مدل سازی فرآیند حفاری و اجرای ایستگاه Z6 به روش شمع و ریب است. نتایج بدست آمده از مدل سازی سه بعدی مراحل مختلف حفاری و اجرای ایستگاه Z6 به روش STM، کاهش قابل توجه میزان نشست سطح زمین نسبت به روش شمع و ریب را نشان می دهد؛ به طوری که حداکثر نشست بدست آمده در حدود ۶/۰۹ میلی متر و مربوط به محدوده جلو سینه کار حفاری است. این میزان تغییر شکل در محدوده پشت سینه کار تا فاصله حدود یک برابر عرض ایستگاه در حدود ۳/۵۲ میلی متر ثبت شده است. در واقع با اجرای مراحل مختلف روش STM برای ایستگاه مورد نظر، نشست زمین با نرخ کمتری نسبت به روش شمع و ریب رخ داده است که نتیجه آن کاهش نشست حداکثری در سطح زمین است؛ همچنین تحلیل پارامتری سازه نگهداری ایستگاه بر مبنای روش STM، نشان داد که با استفاده از این روش، علاوه بر کنترل نشست، می توان برخی از مهم ترین پارامترهای هندسی از جمله، قطر و فاصله طولی شمع و ستون ها، ابعاد هندسی قوس فوقانی و دال میانی را از دیدگاه فنی و اقتصادی بهینه کرد.</p>	<p>روش تونل سازی کم عمق نشست زمین مدل سازی عددی ایستگاه مترو آبرفت تهران</p>

انتخاب یک روش حفاری مناسب برای پروژه های تونلی شهری بزرگ مقطع همچون ایستگاه های مترو در زمین های نرم، به عنوان یک عامل کلیدی برای موفقیت در ساخت آن

۱- پیش گفتار

طراحی و ساخت تونل نیازمند روش ها و تکنولوژی های مناسب در طول اجرای کلیه فازهای یک پروژه تونل است.

* تهران؛ انتهای بزرگراه شهید ستاری؛ میدان دانشگاه؛ بولوار شهدای حصارک؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ گروه مهندسی معدن؛ صندوق پستی شماره ۹۱؛ شماره ی تلفن: ۰۲۱-۴۴۸۶۸۴۰۴؛ داورنگار: ۴۴۸۶۴۲۱-۰۲۱

بررسی رفتار زمین ناشی از حفاری تونل، علاوه بر ایجاد دیدی کلی از تغییرشکل‌های زمین، سبب جلوگیری از خسارت‌های احتمالی به سازه‌های موجود و اقدامات اساسی در برابر هر یک از این خسارات قبل از شروع عملیات حفاری و ساخت تونل می‌شود (Bickel & Kusel, 2003)، (Alebouyeh, et al., 2019) و (Bagheri, et al., 2020).

مساله نشست‌های عمقی و سطحی زمین ناشی از حفاری فضاهای زیرزمینی با توجه به اهمیتی که داشته همواره از سوی محققان مختلف تحت بررسی قرار گرفته است تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب میزان آن را قبل از شروع عملیات حفاری و ساخت برآورد کنند. در زمینه پیش‌بینی تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده ناشی از حفر فضای زیرزمینی، تحقیقات فراوانی صورت گرفته و روش‌های مختلفی ارائه شده است که برخی از آن‌ها بر مبنای اصول محاسباتی و براساس خواص خاک و تعدادی مبتنی بر مشاهدات تجربی هستند (Loganathan & Poulos, 1998)، (Zhang, et al., 2007)، (Gong, et al., 2014)، (Hasanipanah, et al., 2016) و (Wu, et al., 2018). روی هم رفته، روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین ارائه شده است که می‌توان به روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی اشاره کرد. روش‌های عددی با استفاده از کدهای محاسباتی (بسته‌های نرم‌افزاری) امکان مدل‌سازی روند اجرایی تونل، با در نظر گرفتن تأثیر بر سازه‌های مجاور را امکان‌پذیر می‌سازد. مدل‌سازی عددی به عنوان عامل و ابزاری برای پیش‌بینی رفتار خاک هنگام حفاری به کار گرفته می‌شود. از مزایای استفاده از روش‌های عددی می‌توان به پیش‌بینی کلی رفتار خاک و کم هزینه بودن آن اشاره کرد (Liu, et al., 2012)، (Kivi, et al., 2012)، (Dehghan, 2017) و (Zhou, et al., 2018).

ایستگاه متروی آب‌شناسان (Z6) یکی از ایستگاه‌های قطعه شمالی پروژه خط ۶ متروی تهران محسوب می‌شود. روش حفاری و ساخت استفاده شده برای این ایستگاه، روش سنتی شمع و ریب (Pile & Rib) است. یکی از مسائل اصلی حفاری فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری، ضمن حفظ پایداری سازه زیرزمینی، کنترل نشست و جابجایی سطح زمین به جهت ممانعت از آسیب‌های سطحی به سازه‌های روزمینی و حتی زیرزمینی است. از این‌رو لازم

پروژه محسوب می‌شود. هزینه و زمان ساخت تونل به شدت متأثر از انتخاب روش حفاری است. به طوری که انتخاب روش حفاری مناسب تونل‌های بزرگ مقطع در زمین‌های نرم و خصوصاً محیط‌های شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عدم توجه کافی به این موضوع، می‌تواند منجر به ایجاد تغییرشکل و نشست‌های سطحی زمین و در نتیجه آسیب جدی به سازه‌های سطحی و زیرسطحی مجاور شود (Zhang, et al., 2007) و (Sadeghi, et al., 2016). در واقع انتخاب روش مناسب برای حفاری تونل دهانه بزرگ شهری و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو در زمین‌های نرم، عاملی کلیدی برای اتمام موفقیت‌آمیز پروژه است؛ لذا آرایه‌ی روشی بهینه جهت ساخت فضاهای زیرزمینی که نقایص روش‌هایی را نداشته باشد که در حال حاضر متداول می‌باشند و همچنین از نظر اقتصادی و نیز سرعت اجرا و سازگاری با محیط‌زیست مقبول باشند، بسیار حائز اهمیت است. طی سال‌های اخیر، روش تونل‌سازی کم عمق (Shallow Tunneling Method-STM)، به عنوان روش نوین به منظور حفاری و اجرای ایمن فضاهای زیرزمینی با روباره کم و شرایط زمین‌شناسی پیچیده معرفی شده است. روش تونل‌سازی کم عمق (STM)، در واقع یک مفهوم یا فلسفه تونل‌سازی در زمین نرم است تا مجموعه‌ای از تکنیک‌های حفاری و ایجاد تکیه‌گاه. این روش به لحاظ فلسفه طراحی، متفاوت از روش نوین تونل‌سازی اتریشی (New Austrian Tunneling Method-NATM) است (Fang, et al., 2012) و (Guan, et al., 2014). اگر چه این روش نیز برخی از روش‌های بسیار معمول چون، حفاری متوالی، مسلح ساختن زمین، شاتکریت نمودن و پایش را همانند روش NATM اتخاذ می‌نماید. عمق روباره بحرانی که شرایط مدفون کم عمق و شرایط مدفون عمیق را از هم متمایز می‌سازد، از توجه به این موضوع به دست می‌آید که آیا اثر قوسی شدن (Effect arching) می‌تواند به قدر کافی برقرار شود. تحت شرایط مدفون عمیق، فرض می‌شود که ارتفاع ناحیه قوسی، قابل تغییر نمی‌باشد؛ در حالی که در شرایط مدفون کم عمق، نواحی گسیختگی به آسانی به سطح زمین گسترش می‌یابند. گسترش نواحی گسیختگی و تغییرشکل به سطح زمین، منجر به ایجاد نشست‌های سطحی و در نتیجه آسیب به سازه‌های مجاور می‌شود.

ایستگاه آشناسان (Z6) به‌صورت زیرزمینی و در دو طبقه ارایه شده است.

۲-۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی محدوده ایستگاه Z6

حفاری‌های انجام شده در محل ایستگاه آشناسان (Z6)، شامل یک گمانه ماشینی (BH-135) و یک چاهک دستی (TP-212) است که جانمایی آنها در شکل ۲، نشان داده شده است. بر پایه مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی انجام شده در محل ایستگاه Z6، دو نوع لایه خاک شناسایی شده است؛ لایه اول مربوط به سازند C (سازند تهران) تا عمق حدود ۲۸ متری دارای ماسه رس و لای دار به همراه شن (SC-SM) و ماسه رس دار همراه با مقدار کمی شن (SC) با لیزی از شن رس دار (GC) همراه با ماسه است؛ لایه دوم مربوط به سازند A (سازند هزاردره) از عمق ۲۸ متری تا تراز گمانه حفاری شده دارای شن رس دار به همراه ماسه (GC) است. بر اساس شواهد بدست آمده از گمانه حفر شده در محل ایستگاه آشناسان (Z6)، تراز ایستگاه بالاتر از سطح ایستایی قرار دارد. پروفیل طولی زمین‌شناسی مهندسی محل ایستگاه آشناسان بر اساس مطالعات زیرسطحی (حفاری) در شکل ۲، ارایه شده است؛ همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاکی در محل ایستگاه در جدول ۱، ارایه شده است.

۳- ارزیابی اثر حفاری و اجرای ایستگاه Z6 بر نشست سطح زمین

۳-۱- مدل‌سازی عددی مراحل حفاری و اجرای ایستگاه Z6 به روش شمع و ریب

به‌منظور ارزیابی نشست سطح زمین برای ایستگاه Z6، از مدل‌سازی عددی به روش المان محدود استفاده شده است. هدف از تحلیل المان محدود در مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه، بررسی نشست‌های سطحی در امتداد ایستگاه Z6 بواسطه روش حفاری و اجرا است. روش حفاری و اجرای ایستگاه Z6، به‌صورت روش زیرزمینی شمع و ریب است. مقطع عرضی هسته مرکزی ایستگاه Z6، در شکل ۳، نشان داده شده است.

است تا از روش‌های نوینی بکار گرفته شود که امروزه در صنعت تونل‌سازی به منظور ساخت فضاهای زیرزمینی بزرگ به ویژه ایستگاه‌های زیرزمینی ارایه شده‌اند و از ایمنی بالایی طی عملیات حفاری و اجرا برخوردار هستند. در مطالعه حاضر تلاش شده است تا بر مبنای مدل‌سازی عددی و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود *Plaxis 3D Tunnel*، تحلیل و بررسی دقیقی از میزان تغییرشکل و نشست سطح زمین ناشی از اجرای ایستگاه آشناسان (Z6) با دو روش ساخت نوین (تونلسازی کم‌عمق) و سنتی (شمع و ریب) صورت گیرد.

۲- مشخصات پروژه

۲-۱- معرفی ایستگاه آشناسان (Z6)

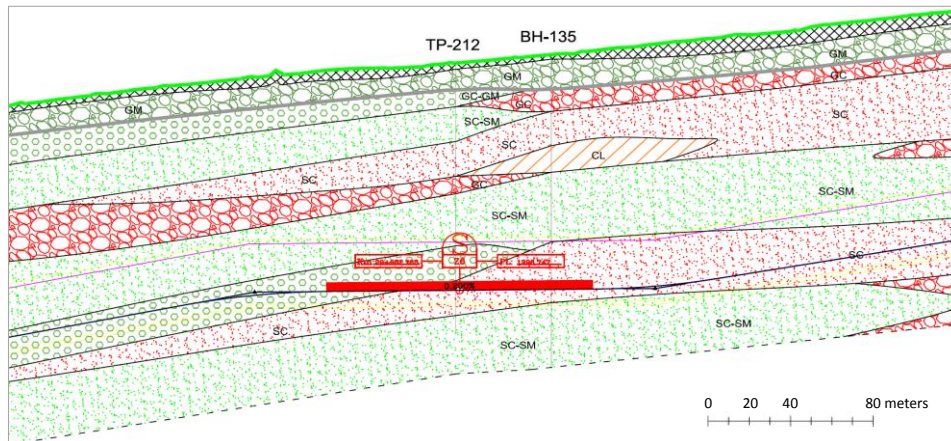
خط ۶ متروی تهران به‌عنوان یکی از خطوط اصلی شبکه متروی تهران، جنوب شرق کلانشهر تهران را به شمال غرب آن متصل می‌کند. این خط به طول تقریبی ۳۶ کیلومتر از حرم حضرت عبدالعظیم (ع) در شهر-ری آغاز شده و با عبور از مناطق پرجمعیت شهر تهران به منطقه کن در شمال غرب تهران ختم می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت ایستگاه Z6 روی نقشه پلان خط ۶ متروی تهران

ایستگاه آشناسان (Z6) نیز در قطعه شمالی خط ۶ متروی تهران در کیلومتراژ ۲۹+۹۰۱ و در منطقه کن قرار دارد (شکل ۱). این ایستگاه در بلوار کوهسار و در تقاطع با بزرگراه آشناسان قرار گرفته است. طرح روش اجرای

امکان سنجی روش نوین تونل سازی کم عمق برای اجرای ایستگاه مترو در شرایط آبرفت تهران، سینا امیری و ...، ص ۲۲۹-۲۵۱

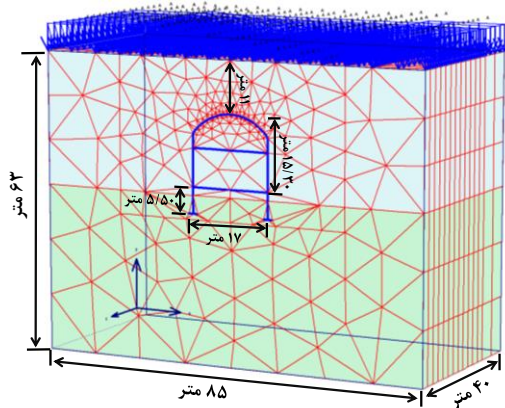


شکل ۲- پروفیل طولی زمین شناسی مهندسی محدوده ایستگاه آشناسان (Z6) (TUSRC, 2017)

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی لایه های خاکی در محل ایستگاه Z6 (TUSRC, 2017)

لایه اول		
$\phi = 36^\circ$	زاویه اصطکاک داخلی	
$C = 0.26 \text{ kg/cm}^2$	چسبندگی	
$\gamma_m = 20 \text{ gr/cm}^3$	وزن مخصوص طبیعی	
$\nu = 0.2$	نسبت پواسون باربرداری و بارگذاری مجدد	
$E_s = 400 \text{ kg/cm}^2$	مدول الاستیسیته	۰-۲۸ m
$E_{ur} = 1200 \text{ kg/cm}^2$	مدول الاستیسیته باربرداری و بارگذاری مجدد	
$m = 0.5$	توان سطح تنش سختی	
$\psi = 0^\circ$	زاویه اتساع	
لایه دوم		
$\phi = 36^\circ$	زاویه اصطکاک داخلی	
$C = 0.26 \text{ kg/cm}^2$	چسبندگی	
$\gamma_m = 20 \text{ gr/cm}^3$	وزن مخصوص طبیعی	
$\nu = 0.2$	نسبت پواسون باربرداری/بارگذاری مجدد	
$E_s = 795 \text{ kg/cm}^2$	مدول الاستیسیته	۲۸-۵۰ m
$E_{ur} = 2380 \text{ kg/cm}^2$	مدول الاستیسیته باربرداری و بارگذاری مجدد	
$m = 0.5$	توان سطح تنش سختی	
$\psi = 7^\circ$	زاویه اتساع	

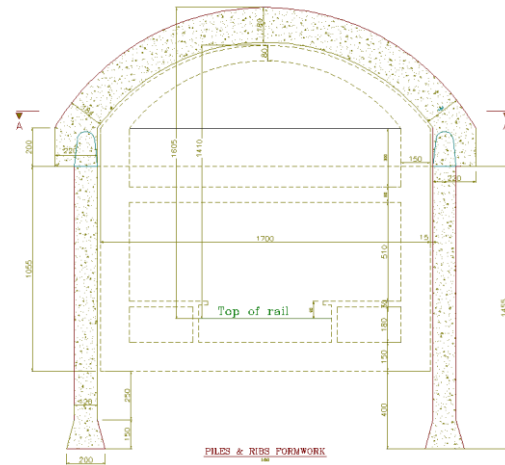
- تنش‌های برجای قائم در مدل به‌صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر با ضریب فشار خاک در حالت سکون $(k=1-\sin(\varphi))$ در نظر گرفته شده است.
- مش‌بندی: المان‌های حجمی مثلثی شکل ۱۵ گره‌ای برای مش‌بندی مدل مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴- مشخصات هندسی مدل سه بعدی ایستگاه Z6 به روش شمع و ریب

در شکل ۴، مشخصات هندسه مدل ساخته شده به همراه مش‌بندی، ارایه شده است. همان‌گونه که در شکل ۴، نشان داده شده است، ایستگاه Z6 در عمق حدود ۲۶/۳۰ متر از سطح زمین قرار داشته و میزان روباره ایستگاه ۱۱ متر است. نسبت ارتفاع روباره (H) به قطر (D) فضای زیرزمینی پدیده قوس‌زدگی کامل در محدوده فضای بالای ایستگاه زیرزمینی و با رسیدن به سطح زمین منجر به تغییرشکل و نشست قابل توجهی گردد (حداقل روباره لازم جهت تشکیل قوسی‌شدگی کامل در جلوی سینه‌کار حفاری، حداقل در حدود ۱ تا ۲ برابر قطر تونل است).

سازه نگهبان هسته مرکزی از شمع‌هایی با قطر ۱/۲ متر و فواصل ۲/۵ متر و ریب‌هایی با عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱/۸ متر تشکیل شده است (شکل ۳). علاوه‌براین، با اجرای دال میانی ایستگاه، مهار جانبی شمع‌ها تأمین می‌شود. دال میانی ایستگاه دارای ۸۰ سانتی‌متر ضخامت است. مشخصات نهایی به‌کار گرفته شده برای اجزای مختلف سازه نگهبان ایستگاه در جدول ۲، ارایه شده است. مدل‌سازی مراحل



شکل ۳- مشخصات هندسی مقطع عرضی هسته مرکزی ایستگاه Z6 (TUSRC, 2018)

در این مرحله، ابتدا روش حفاری و اجرای (شمع و ریب) ایستگاه آبناسان به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS (سه‌بعدی) مدل‌سازی شده و نتایج حاصل به‌صورت نشست‌های سطحی با داده‌های ابزار دقیق ثبت شده در طول فرآیند ساخت، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. از این‌رو فرآیند مدل‌سازی عددی مراحل حفاری و اجرای این ایستگاه به‌صورت زیر انجام شده است (شکل ۴):

- ابعاد مدل در زیر ایستگاه و در سمت چپ و راست آن در حدود چهار برابر شعاع فضای زیرزمینی در نظر گرفته شده است. ابعاد در نظر گرفته شده به گونه‌ای است که از تأثیر شرایط مرزی غیر واقعی به دور است.
- عملیات حفاری ایستگاه مطابق با مراحل حفاری روش شمع و ریب، مدل شده است.
- شرایط مرزی: گیرداری‌های استاندارد به‌صورت مفصلی (ثابت) در کف مدل و نیز به‌صورت غلتکی در کناره‌های قائم مدل در نظر گرفته شده است. جهت مدل‌سازی ترافیک عبوری از سطح، بار گسترده ۲۰ کیلو نیوتن بر متر $(Dehghan et al., 2012)$ و $(Heydari et al., 2013)$ در عرض خیابان در نظر گرفته شده است.
- پارامترهای مصالح: مدل رفتاری خاک سخت شونده $(Hardening soil)$ با مشخصات مهندسی حاصل از مطالعات مطابق جدول ۱، در نظر گرفته شده است.

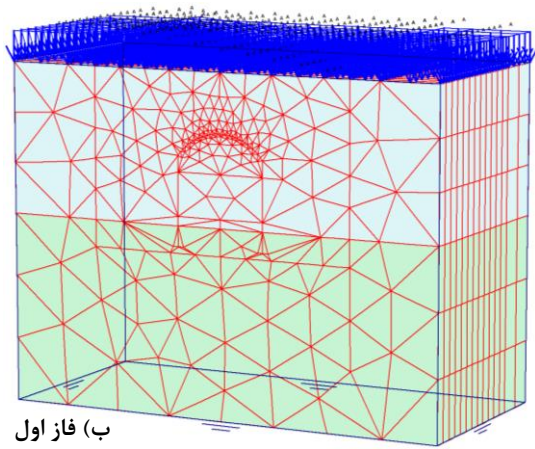
مختلف حفاری و اجرای ایستگاه Z6 در ۶ فاز مجزا به صورت شکل ۵، انجام شده است:
 فاز صفر: ایجاد شرایط اولیه (تنش موثر)
 فاز اول: بارگذاری ترافیک
 فاز دوم: نوسازی تغییر شکل‌ها (صفر کردن تغییر شکل‌ها)
 فاز سوم: حفاری و اجرای شمع و ریب‌ها
 فاز چهارم: حفاری طبقه فوقانی ایستگاه (سالن بلیط فروشی)
 فاز پنجم: اجرای دال میانی
 فاز ششم: حفاری طبقه تحتانی ایستگاه

جدول ۲- مشخصات اجزای مختلف سازه نگهدارنده (TUSRC, 2018)

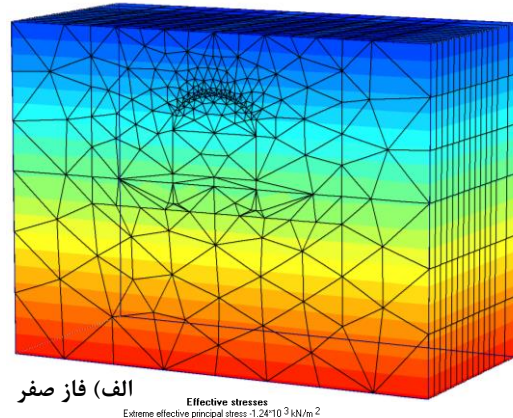
تیر قوسی			
مقاومت فشاری f_c	۲۵ MPa	مدول الاستیسیته E	$۲/۳۹e^۷$ kN/m ²
عرض b	۱/۲ m	سطح مقطع A	۱/۷۳۹ m ²
ارتفاع h	۱/۸ m	ممان اینرسی I	۰/۴۲۸۳ m ⁴
فاصله‌داری Spacing	۲/۵ m	فاکتور ترک‌خوردگی f_c	۰/۷
سختی نرمال EA	$۱/۶۶e^۷$ kN/m ²	صلبیت خمشی EI	$۲/۸۶e^۶$ kN/m ²
تیر			
مقاومت فشاری f_c	۲۵ MPa	مدول الاستیسیته E	$۲/۳۹e^۷$ kN/m ²
عرض b	۱/۲ m	سطح مقطع A	۱/۲ m ²
ارتفاع h	۰/۸ m	ممان اینرسی I	۰/۰۵۱۲ m ⁴
فاصله‌داری Spacing	۲/۵ m	فاکتور ترک‌خوردگی f_c	۰/۳۵
سختی نرمال EA	$۱/۸۸e^۷$ kN/m ²	صلبیت خمشی EI	$۳/۶۱e^۵$ kN/m ²
شمع			
مقاومت فشاری f_c	۲۵ MPa	مدول الاستیسیته E	$۲/۳۹e^۷$ kN/m ²
قطر شمع D pile	۱/۲ m	سطح مقطع A	۱,۱۳۱ m ²
فاصله‌داری Spacing	۲/۵ m	ممان اینرسی I	۰/۱۰۱۸ m ⁴
فاکتور ترک‌خوردگی f_c	۰/۷	سختی نرمال EA	$۱/۰۸e^۷$ kN/m ²
سختی نرمال EI	$۶/۸e^۵$ kN/m ²		

فوقانی، اجرای دال میانی و حفاری بخش تحتانی) به ترتیب ۵/۶۲، ۱۴/۲۸، ۱۹/۸۳ و ۲۳/۶۵ میلی‌متر بدست آمده است (شکل ۶). در شکل ۷، کانتورهای (خطوط هم‌تراز) جابجایی قائم و افقی بدست آمده از مدل‌سازی عددی در مرحله پایانی حفاری مقطع ایستگاه Z6 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۷، نشان داده شده است، حداکثر جابجایی قائم و افقی ایجاد شده در مدل، مربوط به طبقه پایینی ایستگاه است. حداکثر جابجایی قائم (۲۷/۵۷ میلی‌متر) در کف مقطع عرضی ایستگاه به صورت بالاآمدگی و ناشی از عدم اجرای کف بند است (شکل ۷ الف).

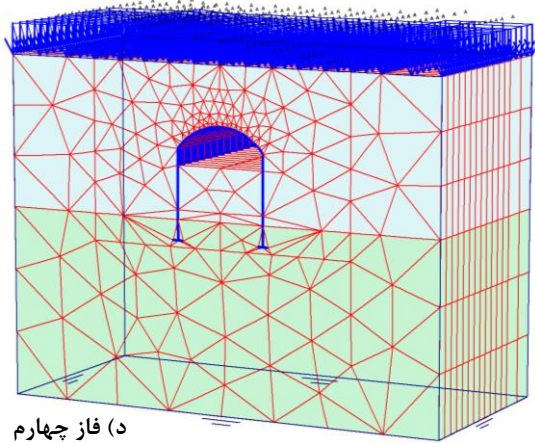
نتایج مدل‌سازی عددی تغییرشکل و نشست سطح زمین ناشی از مراحل مختلف حفاری و اجرای ایستگاه Z6 در شکل ۶، ارایه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با پیشروی مراحل حفاری در بخش‌های مختلف ایستگاه، میزان نشست سطح زمین افزایش یافته است، به طوری که حداکثر نشست حاصل از مدل‌سازی عددی مربوط به فاز نهایی و حفاری کامل مقطع ایستگاه به میزان ۲۳/۶۵ میلی‌متر است. مقادیر نشست ثبت شده برای مراحل اصلی حفاری و اجرای ایستگاه (حفاری و اجرای شمع و ریب، حفاری بخش



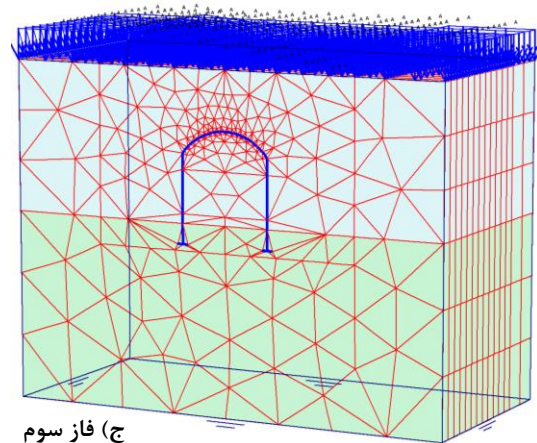
ب) فاز اول



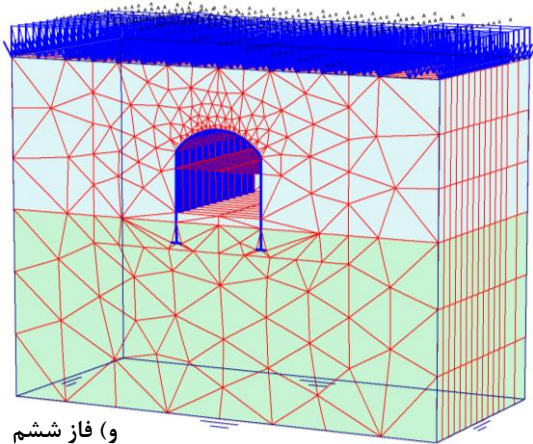
الف) فاز صفر



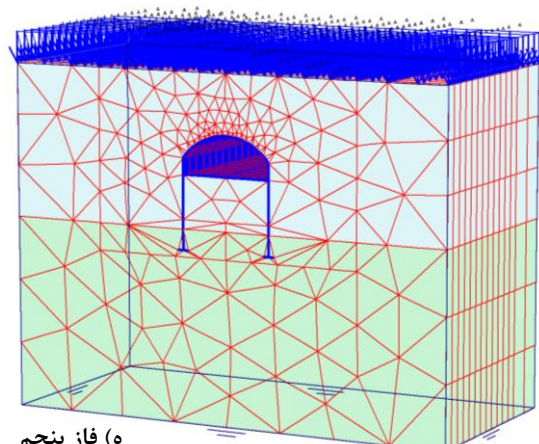
د) فاز چهارم



ج) فاز سوم



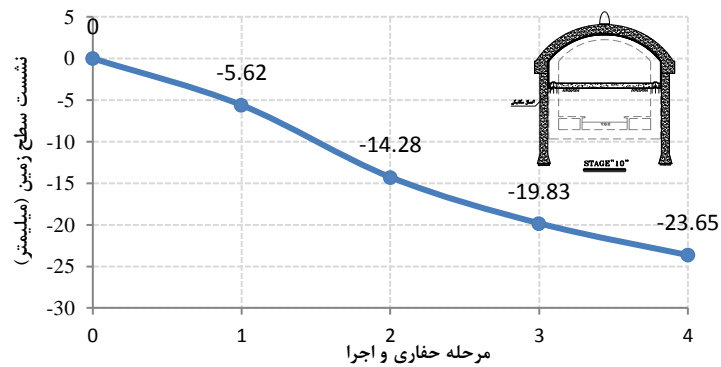
و) فاز ششم



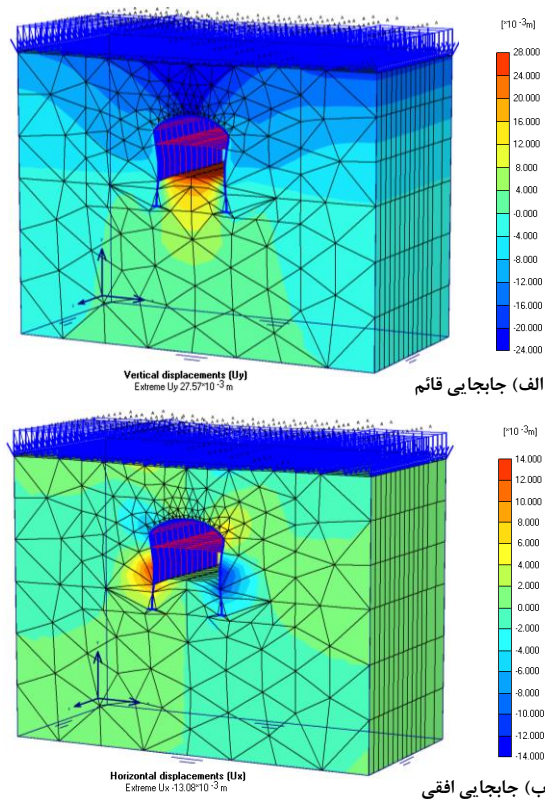
ه) فاز پنجم

شکل ۵- مراحل مختلف مدل‌سازی عددی حفاری و اجرای ایستگاه Z6

امکان‌سنجی روش نوین تونل‌سازی کم عمق برای اجرای ایستگاه مترو در شرایط آبرفت تهران، سینا امیری و ...، ص ۲۲۹-۲۵۱



شکل ۶- مقادیر نشست سطح زمین طی مدل‌سازی مراحل مختلف حفاری و اجرای ایستگاه Z6



شکل ۷- کانتورهای تغییرشکل در مرحله پایانی اجرای ایستگاه Z6 به روش شمع و ریب

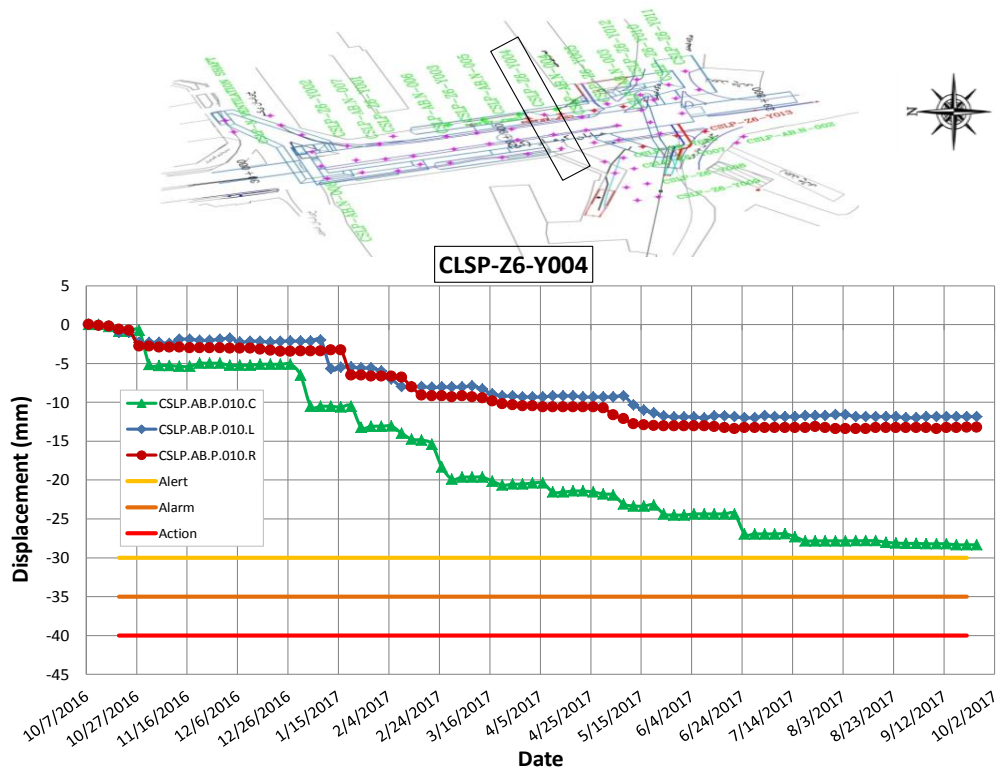
میلی‌متر نشست سطحی، به ترتیب به‌عنوان سطح هوشیاری (*Alert level*)، سطح آماده‌باش (*Alarm level*) و سطح خطر و اقدام (*Action level*) برای مقطع نهایی ایستگاه تعریف شده است (شکل ۸). این مقادیر به ترتیب بر اساس

در پروژه طراحی و ساخت ایستگاه Z6، بر اساس شرایط زمین‌شناختی و ژئوتکنیکی، هندسی فضای زیرزمینی، روش ساخت، الزامات روش حفاری و اجراء، الزامات سازه‌ای و محدودیت‌های خاص پروژه، مقادیر ۳۰، ۳۵ و ۴۰

ابزار دقیق در حدود ۴/۶۸ میلی‌متر است. تطابق بسیار خوب میان داده‌های نشست‌سنجی حاصل از برنامه ابزار دقیق ایستگاه Z6 با نتایج شبیه‌سازی عددی، مبین صحت مدل‌سازی انجام شده است.

در ادامه با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی و کالیبره شدن مدل عددی، شرایط اجرای ایستگاه Z6 با روش نوین تونل‌سازی STM بر مبنای روش المان محدود به صورت سه‌بعدی و در محیط نرم افزار PLAXIS مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نشست پیش‌بینی شده ناشی از حفاری فضای زیرزمینی تعیین می‌شوند. بر اساس تحلیل عددی انجام شده از مراحل مختلف حفاری و اجرای ایستگاه Z6، حداکثر مقدار نشست به دست آمده (۲۳/۶۵ میلی‌متر) از حداقل مقدار نشست مجاز (۳۰ میلی‌متر) نیز کمتر است. همچنین حداکثر مقدار نشست ثبت شده توسط پین‌های نشست‌سنجی (۲۸/۳۳ میلی‌متر) در سطح زمین و در راستای محور تونل (CSLP.AB.P010.C)، کمتر از مقادیر حداقل نشست مجاز است (شکل ۸). اختلاف میان مقادیر نشست حداکثر به دست آمده از مدل‌سازی عددی با داده‌های



شکل ۸- مقادیر نشست ثبت شده توسط پین‌های نشست‌سنجی در موقعیت ایستگاه Z6 (TUSRC, 2017)

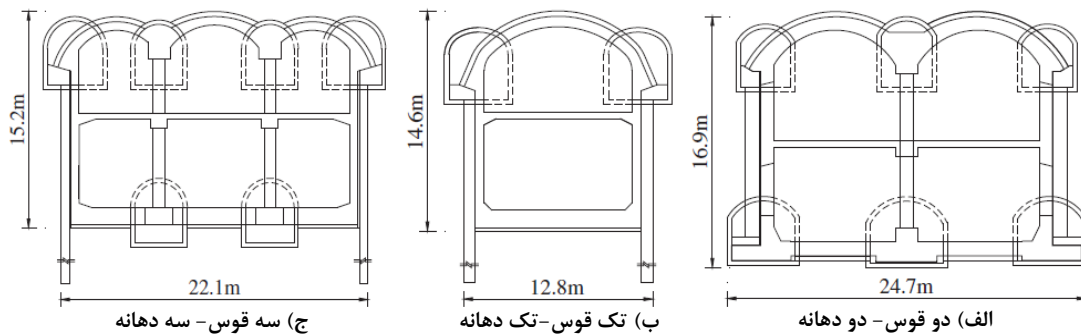
گیرد. اثر قوس‌زدگی محدود و فعال‌سازی محدود مقاومت زمین دو شاخصه مکانیکی اصلی روش STM می‌باشند. پایداری سینه‌کار و شرایط تونل‌سازی خشک، دو پیش شرط لازم در این روش می‌باشند. تعدادی روش‌های کمکی ضروری که برای تحقق بخشی این دو پیش شرط استفاده شده‌اند، شامل پنج قاعده اساسی می‌باشند. این پنج اصل مهم به کار رفته در نگرش STM شامل، روش‌های کمکی،

۳-۲- مدل‌سازی عددی مراحل حفاری و اجرای ایستگاه Z6 به روش تونل‌سازی کم عمق STM

روش نوین تونل‌سازی کم عمق (STM) به منظور حفاری و اجرای فضاهای زیرزمینی بزرگ از جمله ایستگاه‌های مترو در زمین‌های نرم با عمق روباره کم مورد استفاده قرار می

اصلی و اولیه، بسته به شرایط مختلف به صورت سطح مقطع گوناگونی اجرا می‌شود (شکل ۹). از این رو در این مطالعه، روش *PBAA* با توجه به انعطاف‌پذیری بیشتر در اجرا و نیز کنترل مؤثرتر در میزان نشست سطح زمین، به عنوان روش مناسب و پیشنهادی به منظور شبیه‌سازی مراحل حفاری و اجرای ایستگاه *Z6* انتخاب گردید. در مدل‌سازی مراحل حفاری و اجرای ایستگاه *Z6*، با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ابعاد هندسی ایستگاه *Z6*، مقطع شماره (الف) واقع در شکل ۹ به عنوان مقطع نهایی برای این هدف انتخاب گردید.

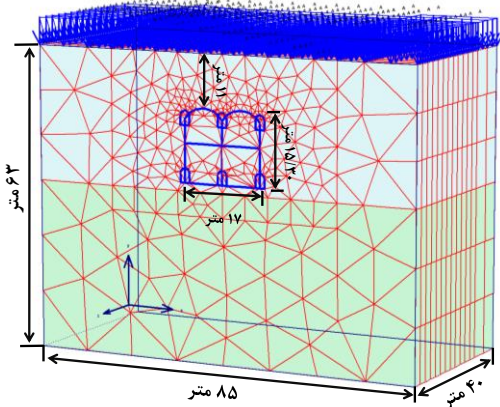
حفاری متوالی با طول پیشروی کوتاه، نگهداری صلب با نصب سریع، زمان کوتاه بسته شدن حلقه و رفتارنگاری تغییرشکل‌های سیستماتیک می‌باشند. روش *STM* بر طبق توالی ساخت به پنج روش اجرایی طبقه بندی می‌شود (*MDA, SDA, DCA, PBAA*) که از این میان، روش *PBAA* روش اجرا با شمع، ستون و قوس (*Pile Beam Arch Approach*)، نسبت به سایر روش‌ها از میزان تغییر شکل و نشست کمتری برخوردار است (Fang, et al., 2012). روش *PBAA* علاوه بر سطح مقطع



شکل ۹- سطح مقاطع مختلف اجرای روش *PBAA* (Fang, et al., 2012)

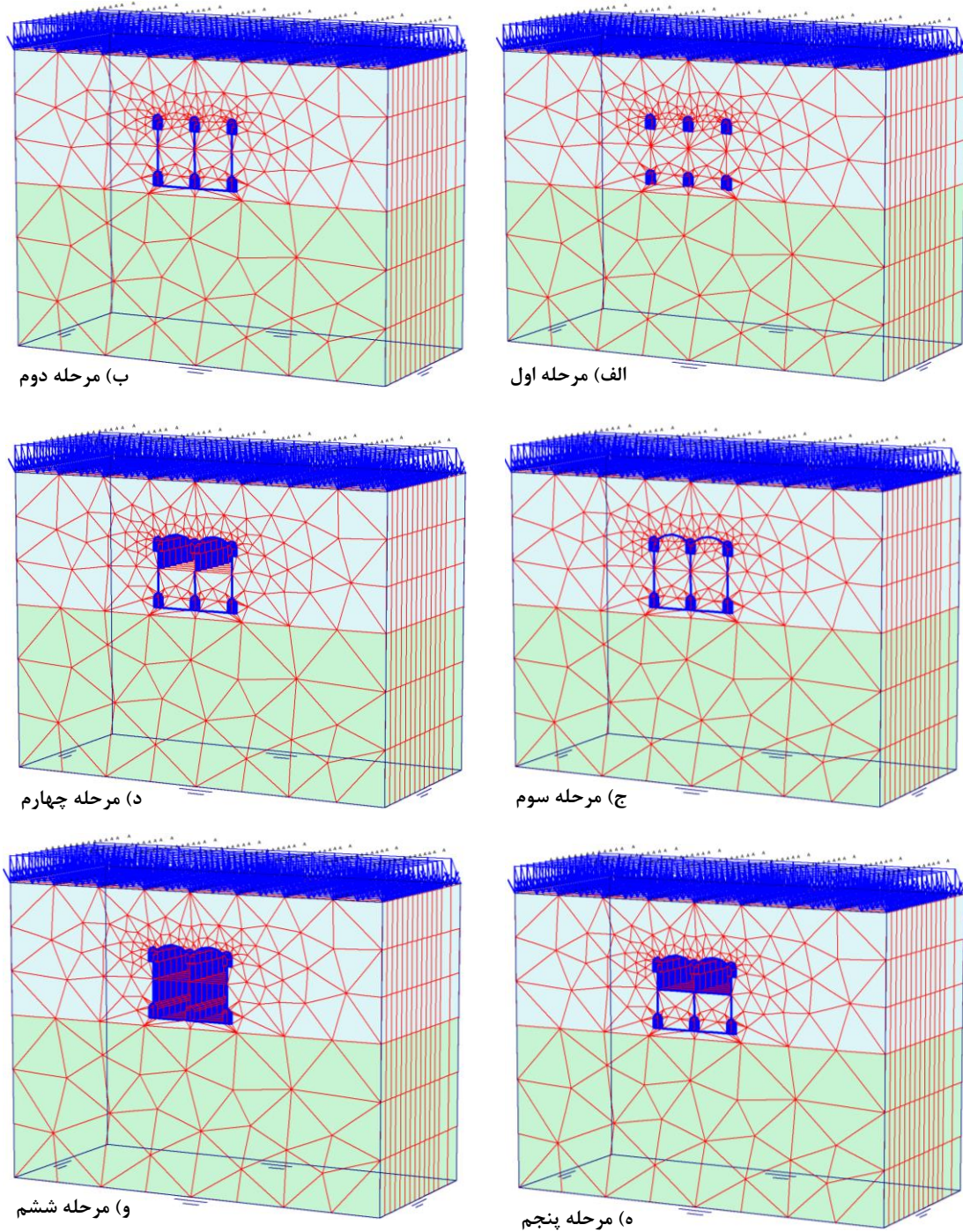
در مرحله اول به صورت همزمان گالری‌های راهنما (جانبی و میانی) مقطع ایستگاه به منظور اجرای شمع‌های جانبی و ستون‌های مرکزی، حفاری و بوسیله یک لایه بتن به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر به همراه دو لایه مش و لیتیس در فواصل یک متری، نگهداری می‌شود (شکل ۱۱ الف).

شرایط مدل‌سازی سه بعدی حفاری و اجرای ایستگاه *Z6* به روش *STM* (*PBAA*) بر اساس شرایط مدل‌سازی سه بعدی در مرحله قبل (روش شمع و ریب) انجام شده است. مدل عددی سه بعدی ساخته شده توسط نرم‌افزار *PLAXIS* از ایستگاه *Z6* که بیانگر هندسه مدل و شرایط مرزی و بارگذاری است، در شکل ۱۰، نشان داده شده است. ابعاد مدل به اندازه‌ای در نظر گرفته شده که میزان اثرات ناشی از مرزها به حداقل قابل قبول برسد. مرزهای جانبی مدل در راستای محورهای x و z و مرز تحتانی مدل در راستای محور y ثابت شده است. بار گسترده‌ای معادل ۲۰ کیلو نیوتن بر مترمربع به عنوان بار ناشی از عبور وسایل نقلیه در سطح خیابان و در بالای ایستگاه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰- مشخصات هندسی مدل سه بعدی ایستگاه *Z6* به روش *STM*

مراحل حفاری و اجرای ایستگاه *Z6* به روش *STM* در شکل ۱۱، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، حفاری و اجرای ایستگاه در ۵ مرحله مدل‌سازی و تغییر شکل و نشست سطح زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۱- مراحل مختلف مدل‌سازی ایستگاه Z6 به روش STM (PBAA)

جانبی، ستون‌های مرکزی و کف بند ایستگاه حفاری و اجرا می‌شود (شکل ۱۱ ب). در مرحله سوم، قوس بخش فوقانی ایستگاه حفاری و اجرا می‌شود (شکل ۱۱ ج) در مرحله

گالری‌های جانبی و میانی با توجه به تعداد و ابعاد هندسی کوچک آنها، به صورت هم‌زمان حفاری و نگهداری شده است. در مرحله دوم، به صورت هم‌زمان محل شمع‌های

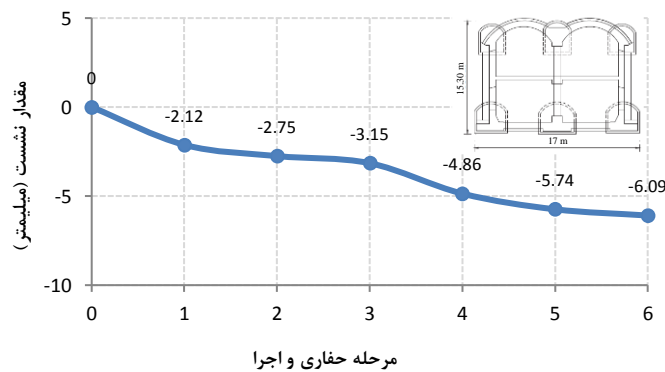
که در شکل ۱۲، نشان داده شده است، مقادیر نشست سطح زمین با پیشروی عملیات حفاری و اجرای بخش‌های مختلف ایستگاه افزایش یافته است. به‌طوریکه حداکثر میزان نشست ثبت شده طی ۶ مرحله‌ی مختلف حفاری و اجرا، مربوط به فاز پایانی و اجرای مقطع نهایی ایستگاه به میزان ۶/۰۹ میلی‌متر است (شکل ۱۲). به‌واسطه نحوه اجرای مناسب بخش‌های مختلف ایستگاه از جمله حفاری و اعمال پوشش نگهداری گالری‌های جانبی و میانی با سطح مقطع نسبتاً کوچک، نصب سیستم‌های پیش‌نگهداری همچون شمع‌های جانبی، ستون‌های میانی و قوس‌های فوقانی، میزان نشست سطح زمین به‌طور قابل‌توجهی نسبت به روش حفاری شمع و ریب کاهش یافته است. روش تونل‌سازی کم عمق با در نظر گرفتن ستون‌های میانی و توزیع مناسب بارهای اطراف روی سقف قوسی ایستگاه که از حالت تک قوسی به دوقوسی تبدیل شده است، نقش بسیار مهمی در کاهش تغییرشکل و نشست سطح زمین داشته است؛ همچنین اثر حفاری گالری‌های جانبی و میانی به‌منظور اجرای شمع و ستون‌های مورد نظر، نقش مهمی در آزادسازی تنش به‌صورت گام به گام و تدریجی در زمین اطراف محدوده ایستگاه Z6 ایفاء کرده است.

چهارم، بخش فوقانی ایستگاه حفاری می‌شود (شکل ۱۱ د). در مرحله پنجم نیز با حفاری طبقه فوقانی، دال میانی ایستگاه به‌منظور تأمین مهار جانبی شمع‌ها اجرا می‌شود (شکل ۱۱ ه). در مرحله پایانی و ششم، طبقه زیرین ایستگاه تا تراز کف بند اجرا شده و حفاری می‌شود (شکل ۱۱ و).

مشخصات مصالح استفاده شده برای شمع و ستون و نیز قوس ایستگاه مشابه مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح استفاده شده برای روش شمع و ریب است (جدول ۲)؛ همچنین در این مطالعه مشخصات پارامترهای مقاومتی شمع و ستون با یکدیگر برابر در نظر گرفته شده است. با لحاظ نمودن فاکتور ترک‌خوردگی، *Crack factor* ($f_c=0.135$) برای مقطع پوشش موقت گالری‌های راهنما (شامل شاتکریت به همراه مش و لتیس در فواصل ۱ متر)، پارامترهای مقاومتی مورد نظر برای این مقطع به‌صورت زیر خواهند بود (مقطع شاتکریت به‌صورت مستطیلی با ابعاد ۳۰ در ۱۰۰ سانتی‌متر است):

$$\Rightarrow \begin{cases} EA = 2.13 \times 10^7 \times 0.3 = 6.39 \times 10^6 \text{ kN} \\ EI_{cr} = 0.35 \times 2.13 \times 10^7 \times 0.00225 = 1.677 \times 10^4 \text{ kN.m}^2 \end{cases}$$

نتایج مدل‌سازی مراحل مختلف حفاری و اجرای ایستگاه Z6 در شکل ۱۲، نشان داده شده است. همان‌گونه



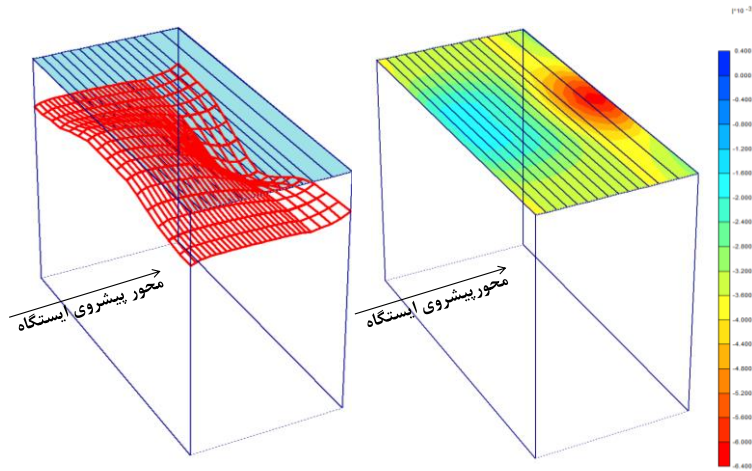
شکل ۱۲- مقادیر نشست سطح زمین طی مدل‌سازی مراحل مختلف حفاری و اجرای ایستگاه Z6

همانطور که در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود، میزان تغییرشکل و نشست سطح زمین در جلو سینه‌کار نسبت به موقعیت پشت سینه‌کار بیشتر است. میزان نشست برآورد شده در جلو سینه‌کار در فاصله تقریباً کمتر از نصف عرض مقطع ایستگاه به میزان حداکثر مقدار خود در حدود ۶/۰۹ میلی‌متر رسیده است. این میزان نشست در موقعیت سینه

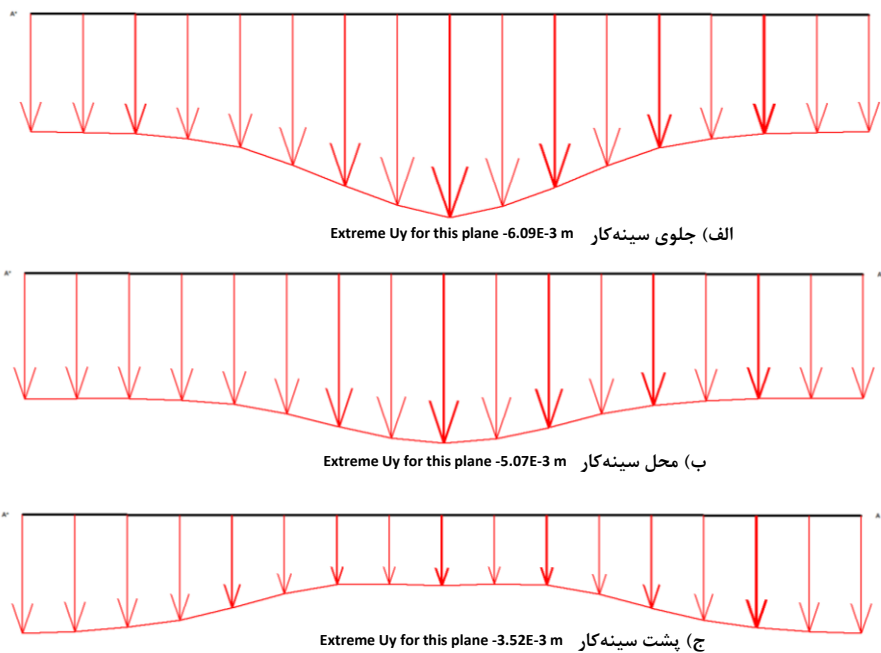
با بررسی پروفیل طولی و سه بعدی نشست سطح زمین مربوط به بخش‌های مختلف ایستگاه از جمله در موقعیت‌های جلو و پشت سینه‌کار حفاری، مشخص است که میزان تغییر شکل و نشست سطح زمین در جلو سینه‌کار نسبت به موقعیت سینه‌کار و همچنین در فاصله پشت سینه‌کار، افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد (شکل ۱۳).

یافته است (شکل ۱۴).

کار و نیز در فاصله حدود یک برابر عرض ایستگاه در پشت سینه‌کار به ترتیب به میزان ۵/۰۷ و ۳/۵۲ میلی‌متر کاهش



شکل ۱۳- پروفیل سه بعدی نشست سطح زمین در محدوده ایستگاه Z6



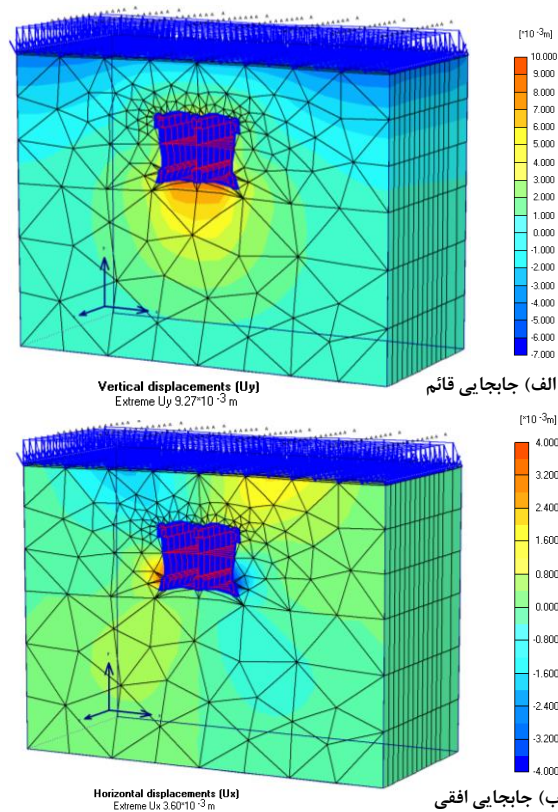
شکل ۱۴- پروفیل عرضی نشست سطح زمین در موقعیت‌های مختلف سینه‌کار ایستگاه Z6

محور ایستگاه، میزان نشست عرضی سطح زمین افزایش یافته است. با اجرای مناسب سیستم نگهداری فضای زیرزمینی ایستگاه (شمع، تیر، قوس و غیره) و اندرکنش آن

همان‌گونه که در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ ج نشان داده شده است، از محل شروع مقطع ایستگاه در پشت سینه‌کار تا فاصله حدود نصف عرض ایستگاه به سینه‌کار، با فاصله از

زمین در محور ایستگاه نسبت به زمین اطراف افزایش یافته است (شکل ۱۳ و شکل ۱۴ ب و ج). تغییرشکل قائم ناشی از مدل‌سازی مراحل مختلف ایستگاه نشان می‌دهد که بیشترین میزان جابجایی (۹/۲۷ میلی‌متر) مربوط به کف ایستگاه و ناشی از بالآمدگی (آماس) است (شکل ۱۵)؛ همچنین حداکثر تغییر شکل افقی بوجود آمده در راستای محور x (عمود بر محور تونل)، مربوط به طبقه تحتانی ایستگاه به میزان ۳/۶ میلی‌متر است.

با توده خاک دربرگیرنده ایستگاه نسبت به فاصله دورتر، منجر به افزایش میزان مقاومت زمین و در نتیجه کاهش تغییرشکل و نشست سطح زمین در راستای محور ایستگاه شده است. با نزدیک شدن به سینه‌کار حفاری و به واسطه بزرگ بودن سطح مقطع سینه‌کار، ناحیه خمیری (پلاستیک) خاک اطراف و به‌ویژه در سینه‌کار افزایش یافته و در نتیجه منجر به افزایش تغییرشکل زمین در امتداد محور ایستگاه شده است، به طوری که میزان تغییر شکل و نشست سطح

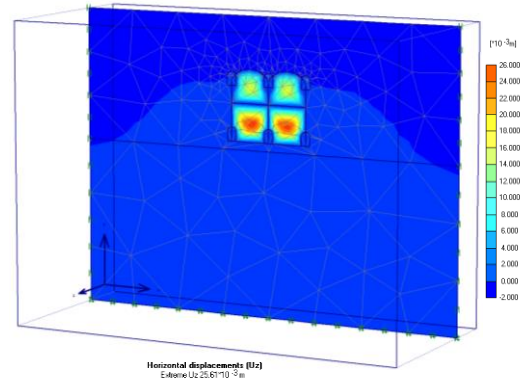


شکل ۱۵- کانتورهای تغییرشکل در مرحله پایانی اجرای ایستگاه Z6 به روش STM

هم در راستای محور ایستگاه (محور z) در موقعیت سینه‌کار حفاری خصوصاً در طبقه پایینی ایستگاه است (شکل ۱). در واقع همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، عامل اصلی ایجاد تغییر شکل و نشست سطح زمین در موقعیت سینه‌کار و نیز در جلو سینه‌کار حفاری، ناشی از تغییر شکل‌های قابل توجه به‌صورت برآمدگی (*Extrusion*) در هسته سینه‌کار حفاری (*Core face*) ایستگاه است.

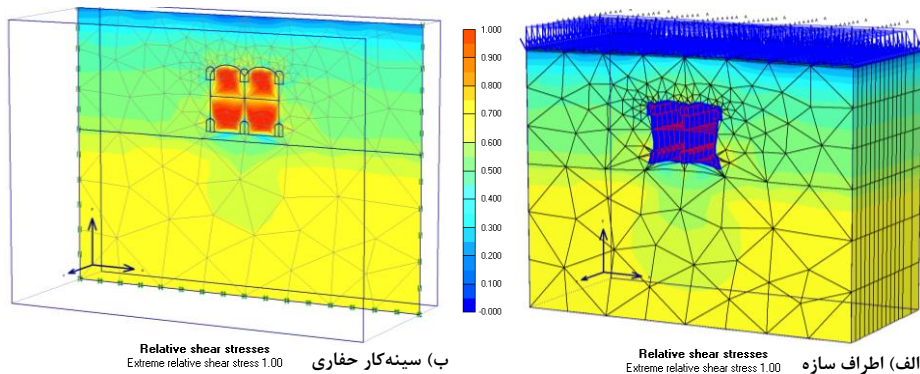
نکته قابل توجه در مدل‌سازی مراحل حفاری و اجرای بخش‌های ایستگاه Z6، علاوه بر تغییرشکل‌های قائم و افقی (عمود بر محور تونل)، تغییرشکل‌های افقی در امتداد محور ایستگاه مورد نظر است. همان‌گونه که در شکل ۱۶، نشان داده شده است، حداکثر تغییر شکل ایجاد شده پس از اجرای کامل ایستگاه Z6، به میزان ۲۵/۶۱ میلی‌متر است. با بررسی بیشتر این موضوع مشخص شد که حداکثر تغییر شکل مشاهده شده در مدل مربوط به تغییرشکل افقی و آن

سیستم‌های پیش‌نگهداری و حفاری طبقه فوقانی و تحتانی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۷ ب نشان داده شده است، حداکثر تنش برشی نسبی در محدوده سینه‌کار حفاری اتفاق افتاده است که خود بیانگر پتانسیل بالای تغییرشکل در سینه‌کار و فضای اطراف آن است. این میزان نسبت تنش در طبقه تحتانی نسبت به طبقه فوقانی ایستگاه بیشتر مشاهده می‌شود. تنش برشی نسبی در اطراف فضای زیرزمینی ایستگاه و نیز به طرف سطح زمین به دلیل اجرای پوشش نگهداری کمتر رخ داده است (شکل ۱۷ الف). نواحی پلاستیک ایجاد شده در اطراف فضای زیرزمینی ایستگاه به واسطه وجود پوشش نگهداری از گسترش کمتری نسبت به موقعیت سینه‌کار حفاری برخوردار است (شکل ۱۸). توسعه زون پلاستیک یا خمیری در نواحی هسته سینه‌کار و اطراف آن خود نیز سبب افزایش تغییر شکل خصوصاً تغییرشکل افقی و در نتیجه با توسعه تغییرشکل و رسیدن به سطح زمین به‌صورت نشست نمایان می‌شود (شکل ۱۸ ب).

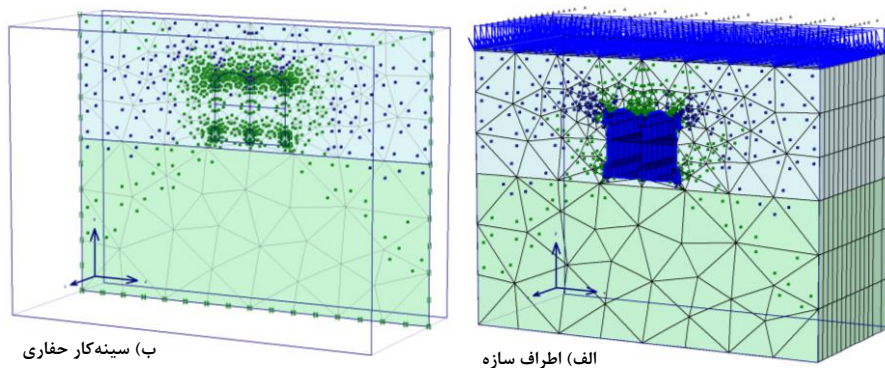


شکل ۱۶- کانتورهای تغییرشکل افقی سینه‌کار حفاری در راستای محور حفاری ایستگاه Z6

در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ نیز به ترتیب میزان تنش برشی نسبی (*Relative shear stress*) و ناحیه خمیری (*Plastic zone*) اطراف ایستگاه پس از اتمام عملیات اجرای



شکل ۱۷- کانتورهای تنش برشی نسبی در موقعیت‌های مختلف ایستگاه Z6



شکل ۱۸- وضعیت ناحیه خمیری در موقعیت‌های مختلف ایستگاه Z6

برآمدگی سینه‌کار حفاری) در راستای محور حفاری افزایش یافته و در نتیجه منجر به تغییر شکل‌های قابل توجه در اطراف ایستگاه و سطح زمین شده است.

در صورتی‌که بتوان در روش نوین *STM* علاوه بر سیستم‌های پیش‌نگهداری فضای زیرزمینی (شمع، ستون، قوس و غیره)، از روش‌های کمکی تقویت زمین نظیر پیش‌نگهداری (فورپولینگ (*Forepoling*))؛ اجرای سقف چتری شکل با تزریق دوغاب در لوله‌های فلزی در جلو سینه‌کار، تقویت سینه‌کار (فیس‌بولتینگ (*Face bolting*))؛ تقویت زمین با تزریق دوغاب در درون لوله‌های فایبرگلاس در سینه‌کار، تقویت پاشنه‌کار (فوت‌پایلینگ (*Foot piling*))؛ اجرای ریزشمع در پاشنه‌های فضای زیرزمینی) و غیره استفاده کرد، می‌توان تغییرشکل‌های ایجاد شده در موقعیت سینه‌کار و نیز جلو سینه‌کار ایستگاه که ناشی از عدم تقویت مناسب هسته سینه‌کار است را به میزان تغییر شکل نشست ایجاد شده در پشت سینه‌کار ایستگاه (۳/۵۲) کاهش داد؛ همچنین اجرای فوت‌پایلینگ یا میکروشمع‌ها در پاشنه مقطع ایستگاه می‌تواند به میزان قابل‌توجهی از تغییر شکل قائم ایجاد شده به‌صورت بالآمدگی جلوگیری نماید.

۴- آنالیز حساسیت سیستم نگهداری بهینه

ایستگاه Z6

از آنجائی‌که میزان حداقل نشست مجاز تعیین شده برای ایستگاه Z6، ۳۰ میلی‌متر است و با توجه به کاهش چشمگیر میزان نشست برآورد شده با روش *STM*، یک آنالیز حساسیت روی برخی از مهم‌ترین پارامترهای اجرایی سیستم پیش‌نگهداری ایستگاه Z6 به منظور دستیابی به یک سیستم بهینه نگهداری انجام شد. تحلیل مورد نظر روی فاصله طولی اجرای شمع‌های جانبی و ستون‌های مرکزی ایستگاه و نیز ابعاد هندسی آنها انجام گرفت. نتایج آنالیز انجام شده به‌صورت سه بعدی و بر اساس مدل‌سازی عددی به روش *STM* در جدول ۳، ارائه شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که با در نظر گرفتن میزان نشست مجاز در سطح زمین (۳۰ میلی‌متر) می‌توان با تغییر در برخی از مؤلفه اجرایی ایستگاه از جمله مشخصات هندسی سیستم های پیش‌نگهداری، بهینه‌سازی قابل توجهی از دیدگاه فنی در اجرای پروژه انجام داد. همانطور که در جدول ۳، نشان

روی‌هم‌رفته با توجه به اینکه مقادیر نشست سطح زمین که مبنای اصلی بررسی و آنالیز مراحل حفاری و اجرای مقطع ایستگاه مورد نظر در این مطالعه است، در مقایسه با مقادیر حداکثر نشست حاصل از روش رایج و سنتی شمع و ریب (۲۳/۶۵ میلی‌متر - شکل ۶) به‌طور قابل توجهی و در حدود ۷۴ درصد کاهش یافته است؛ همچنین مقادیر نشست حداکثر بدست آمده از روش *STM* (۶/۰۹ میلی‌متر) در مقایسه با حداقل میزان نشست مجاز سطح زمین (۳۰ میلی‌متر) (شکل ۸)، در حدود ۸۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. در واقع همگرایی ایجاد شده در جلو سینه‌کار نسبت به همگرایی ایجاد شده در پشت سینه‌کار حفاری ایستگاه به‌واسطه بزرگ شدن سطح مقطع افزایش یافته است. در پشت سینه‌کار حفاری به‌واسطه وجود سیستم‌های نگهداری، میزان تغییر شکل و نشست سطح زمین کاهش قابل توجهی دارد (حداکثر ۳/۵۲ میلی‌متر)، اما در جلو سینه‌کار به‌دلیل عدم اجرای سیستم پیش‌نگهداری و تقویت زمین، میزان تغییرشکل و نشست سطح زمین مقدار بیشتری را نشان می‌دهد (حداکثر ۶/۰۹ میلی‌متر) (صرفنظر از حداکثر تغییر شکل مشاهده شده در موقعیت سینه‌کار و جلو سینه‌کار و با در نظر گرفتن حداکثر نشست سطح زمین در محدوده پشت سینه‌کار (۳/۵۲)، اختلاف نشست سطح زمین میان دو روش ساخت ایستگاه (شمع و ریب و *STM*) بیشتر و در حدود ۸۸ درصد خواهد بود).

از آنجائی‌که در روش شمع و ریب ابتدا سیستم‌های نگهداری ایستگاه از جمله شمع‌ها و ریب‌ها در طول ایستگاه به‌صورت سیستم پیش‌نگهداری فضای زیرزمینی اجرا شده و سپس عملیات حفاری طبقه فوقانی و تحتانی ایستگاه اجرا می‌شود، از این‌رو در مدل‌سازی فرآیند حفاری و اجرای ایستگاه Z6 به روش *STM* سعی شد، همانند روش شمع و ریب، ابتدا کلیه المان‌های مربوطه همچون شمع‌ها، ستون‌ها و قوس‌ها اجرا و سپس عملیات حفاری بخش‌های فوقانی و تحتانی انجام شود. نتایج مدل‌سازی نشان داد که اجرای سیستم‌های پیش‌نگهداری در اطراف فضای زیرزمینی پیش از عملیات حفاری به‌خوبی مانع از افزایش تغییر شکل و نیز نشست سطح زمین شده است؛ اما با بزرگ شدن سطح مقطع فضای حفاری، به دلیل عدم پایداری مناسب زمین در هسته سینه‌کار، میزان تغییرشکل افقی (اکستروژن یا

ایستگاه مورد نظر به روش تونل‌سازی کم عمق (*STM*)، در محدوده نشست مجاز تعیین شده در مرحله طراحی قرار دارد. لازم به ذکر است که ابعاد هندسی (عرض و ارتفاع) دال میانی ایستگاه نیز در این تحلیل از ۱/۲۰ در ۰/۸۰ متر به ۱ در ۰/۶۰ متر کاهش داده شده است.

از این رو می‌توان بر اساس مطالعه و آنالیز انجام شده در این تحقیق، اینگونه استنباط کرد که با در نظر گرفتن روش نوین تونل‌سازی کم عمق (*STM*) به جای روش سنتی و رایج شمع و ریب، می‌توان به عملیات اجرایی و ساخت پروژه‌های ایستگاه مترو در شرایط زمین‌شناسی آبرفت تهران از دیدگاه فنی و مهندسی کمک شایانی کرد.

داده شده است، با اجرای شمع‌ها و ستون‌ها در فواصل حدود ۳/۲۵ متر، اجرای قطر شمع‌ها و ستون‌ها به اندازه ۱۰۰ سانتی‌متر و نیز ابعاد هندسی قوس‌های فوقانی ایستگاه به اندازه ۱۰۰ (عرض) در ۱۳۰ (ارتفاع) سانتی‌متر، میزان نشست برآورد شده در محدوده مجاز نشست سطحی زمین قرار دارد (۲۹/۳۰). به عبارتی با افزایش فاصله طولی میان شمع‌ها و ستون‌های ایستگاه از ۲/۵۰ متر به ۳/۲۵ متر، کاهش قطر شمع‌ها و ستون‌های اجرایی از ۱/۲۰ متر به ۱ متر و نیز کاهش ابعاد هندسی (عرض و ارتفاع) تیر قوسی در سقف ایستگاه از ۱/۲۰ در ۱/۸۰ متر به ۱ متر در ۱/۳۰ متر، نشست سطح زمین با اجرای مراحل حفاری و ساخت

جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت مشخصات هندسی سیستم نگهداری

ردیف	عنوان مدل	ضخامت شاکریت (m)	قطر شمع (m)	قطر ستون (m)	ابعاد تیر قوسی (m)	ابعاد دال میانی (m)	فاصله		نشست مجاز (mm)
							طولی شمع / ستون (m)	حداکثر نشست (mm)	
۱	مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیند حفاری و ساخت ایستگاه به روش شمع و ریب مدل‌سازی سه بعدی فرآیند حفاری و ساخت ایستگاه به روش <i>STM</i>	-	۱/۲	-	۱/۲×۱/۸	۱/۲×۰/۸	۲/۵	۲۳/۶۵	۳۰
۲	مدل‌سازی سه بعدی فرآیند حفاری و ساخت ایستگاه به روش <i>STM</i>	۰/۳	۱/۲	۱/۲	۱/۲×۱/۸	۱/۲×۰/۸	۲/۵	۶/۰۹	۳۰
۳	آنالیز حساسیت سیستم نگهداری	۰/۲	۱	۱	۱×۱/۳	۱×۰/۶	۳/۲۵	۲۹/۳	۳۰

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل‌سازی فرآیند حفاری و اجرای ایستگاه آب‌شناسان (*Z6*) واقع در خط ۶ متروی تهران به دو روش ساخت شمع و ریب و تونل‌سازی کم عمق (*STM*) انجام شد. مدل‌سازی‌های عددی به صورت سه‌بعدی به روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار *Plaxis 3D tunnel* صورت گرفت. هدف، ارزیابی فنی و اجرایی هر دو روش حفاری و

ساخت به منظور بررسی امکان‌سنجی اجرای روش نوین *STM* در شرایط آبرفت تهران بود. ارزیابی فرآیند اجرای هر دو روش بر مبنای مقادیر داده‌های ابزار دقیق و نشست مجاز صورت گرفت. از این رو بر اساس مطالعات انجام شده در این مطالعه، مهم‌ترین نتایج حاصل به شرح ذیل است:

۱- حداکثر نشست حاصل از فرآیند حفاری و ساخت ایستگاه *Z6* به روش سنتی شمع و ریب در طول چهار مرحله اصلی (حفاری و اجرای شمع و تیر قوسی، حفاری بخش

روش *STM* نسبت به روش شمع و ریب، همچنان مقداری تغییرشکل ناشی از آزادسازی تنش در کف مقطع ایستگاه به‌صورت بالآمدگی مشاهده می‌شود.

۷- حداکثر میزان تغییرشکل و جابجایی ایجاد شده در روش *STM* مربوط به تغییرشکل افقی به میزان ۲۶/۶۱ میلی‌متر و در راستای محور حفاری (z) به‌صورت برآمدگی مشاهده می‌شود. این میزان تغییر شکل در مدل ناشی از بزرگ شدن سطح مقطع سینه‌کار ایستگاه بوده است که تا فاصله حدود نصف عرض ایستگاه ادامه دارد. به دلیل عدم پایداری و نگهداری مناسب زمین در هسته سینه‌کار، میزان تغییرشکل افقی (برآمدگی سینه‌کار حفاری) به سمت فضای داخل ایستگاه افزایش یافته و این افزایش تغییرشکل و جابجایی منجر به توسعه هر چه بیشتر آن به‌سمت بالا شده است که با رسیدن به سطح زمین به‌صورت جابجایی قائم و نشست مشاهده می‌شود.

۸- آنالیز حساسیت تعیین سیستم بهینه نگهداری فضای زیرزمینی ایستگاه به روش *STM* در زمان حفاری و ساخت نشان داد که می‌توان با تغییر و تعدیل برخی از مهم‌ترین پارامترهای هندسی سیستم‌های نگهداری فضای زیرزمینی ایستگاه از جمله قطر و فاصله طولی شمع و ستون‌ها، ابعاد هندسی قوس فوقانی و دال میانی ایستگاه و غیره، عملکرد بهتر و موفق‌تری از دیدگاه فنی و مهندسی این روش برای بکارگیری در ساخت ایستگاه‌های مترو و در شرایط آبرفت تهران انتظار داشت.

۹- روش نوین حفاری و ساخت ایستگاه *Z6* به روش *STM* در مقایسه با روش سنتی شمع و ریب از عملکرد بهتری در کاهش و کنترل تغییرشکل و نشست سطح زمین برخوردار می‌باشد.

۱۰- بر اساس مطالعه و بررسی‌های انجام شده از امکان‌سنجی اجرای روش حفاری و ساخت تونل‌سازی کم عمق (*STM*) در شرایط آبرفت تهران، می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که استفاده از این روش نه تنها منجر افزایش ایمنی و کاهش خطرات ناشی از نشست‌های سطحی در طول عملیات اجرا و ساخت ایستگاه‌های مترو در شرایط تهران خواهد شد، بلکه می‌تواند منجر به بهینه‌سازی در زمان و هزینه‌های ساخت اینگونه پروژه‌های بزرگ نیز گردد.

فوقانی، اجرای دال میانی و حفاری بخش تحتانی) به‌ترتیب ۵/۶۲، ۱۴/۲۸، ۱۹/۸۳ و ۲۳/۶۵ میلی‌متر بدست آمده است. به‌عبارتی با پیشروی عملیات اجرایی ایستگاه و نیز بزرگ شدن سطح مقطع حفاری، میزان تغییر شکل و نشست سطح زمین افزایش یافته است.

۲- حداکثر نشست سطح زمین (۲۳/۶۵ میلی‌متر) در روش شمع و ریب در محدوده حداقل نشست مجاز (۳۰ میلی‌متر) قرار دارد؛ همچنین این مقدار نشست با داده‌های نشست سنجی که توسط ابزار دقیق ثبت شده است (۲۸/۳۳ میلی‌متر)، تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

۳- حداکثر جابجایی مشاهده شده در مدل‌سازی فرآیند حفاری و اجرای روش شمع و ریب به مقدار ۲۷/۵۷ میلی‌متر بوده است که این مقدار تغییر شکل به‌صورت جابجایی قائم و بالآمدگی در کف مقطع ایستگاه به واسطه عدم اجرای کف بند است.

۴- مدل‌سازی فرآیند حفاری و اجرای ایستگاه *Z6* به روش *STM* طی شش مرحله‌ی مختلف به‌منظور بررسی تغییرشکل و نشست سطح زمین انجام گرفت که با پیشرفت مراحل مختلف اجرایی ایستگاه، حداکثر نشست سطح زمین از ۲/۱۲ میلی‌متر در مرحله حفاری و نگهداری گالری‌های مرکزی و جانبی برای اجرای شمع و ستون‌ها، به ۶/۰۹ میلی‌متر برای حفاری طبقه تحتانی و کامل شدن مقطع نهایی ایستگاه افزایش یافته است.

۵- حداکثر جابجایی قائم (نشست) برآورد شده از مدل‌سازی عددی فرآیند حفاری و اجرای ایستگاه *Z6* به روش *STM*، مربوط به موقعیت جلوی سینه‌کار حفاری (نصف عرض ایستگاه) به میزان ۶/۰۹ میلی‌متر است. این میزان نشست در مرحله پایانی مدل‌سازی سه بعدی در موقعیت سینه‌کار و پشت سینه‌کار (در فاصله حدود یک برابر عرض ایستگاه) به‌ترتیب ۵/۰۷ و ۳/۵۲ میلی‌متر بدست آمده است.

۶- در مدل‌سازی سه بعدی مراحل حفاری و اجرای ایستگاه، بیشترین تغییرشکل و جابجایی قائم (در جهت مثبت) به مقدار ۹/۲۷ میلی‌متر بوده است که مربوط به بالآمدگی کف ایستگاه است. علی‌رغم اجرای کف بند در

۶- سیاهه‌ی نمادها

تمامی نمادهای مورد استفاده در متن مقاله در جدول ۴.

ارایه شده است.

جدول ۴- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
عرض المان	m	b
ارتفاع المان	m	h
روباره تونل	m	C
عمق تونل	m	H
قطر تونل (فضای حفاری)	m	D
وزن مخصوص طبیعی	kN/m^3	γ_m
وزن مخصوص اشباع	kN/m^3	γ_{sat}
مدول الاستیسیته/بانگ	MPa	E
مدول الاستیسیته سکانتی	MPa	E_s
مدول الاستیسیته باربرداری و بارگذاری مجدد	MPa	E_{ur}
نسبت پواسون	NU	ν
چسبندگی	kPa	c
زاویه اصطکاک داخلی	$deg.$	ϕ
زاویه اتساع	$Deg.$	Ψ
ممان اینرسی	m^4	I
سختی نرمال/محوری	kN	EA
صلبیت خمشی	$kN.m^2$	EI
مقاومت فشاری	MPa	f'_c
فاکتور ترک‌خوردگی	NU	f_e
سطح مقطع	m^2	A
شعاع تونل (فضای حفاری)	m	R
فاصله از سینه کار	m	x
توان سطح تنش سختی	NU	m
ضریب کاهش بار	NU	β
ضریب کاهش همجواری	NU	λ

۷- مراجع

- Alebouyeh, A., Dehghan, A. N., & Goshtasbi, K. (2019). Identifying the geological hazards during mechanized tunneling in urban areas – the case of Tehran alluvium conditions. In *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art* (pp. 5264-5274). CRC Press.
- Baudendistel, M. (1979). Zum Entwurf von Tunneln mit großem Ausbruchquerschnitt. In *Berechnung, Erkundung und Entwurf von Tunneln und Felsbauwerken/Computation, Exploration and Design of Tunnels and Rock Structures* (pp. 75-100). Springer, Vienna.

- Bagheri, E., Dehghan, A. N., & Ahangari, K. (2020). The Effect of Operational Parameters Affecting Ground Surface in Excavation with Earth Pressure Balance Shield Machine - EPBM (the Case of Southern Extension Tunnel of Line 6 of Tehran Subway) Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE), 9(1), 83-100.
- Bickel, O & Kusel, T. R., (2003). "Tunnel Engineering", Hand Book Van Nostrand Reinhold Co.
- Dehghan, A. N., Shafiee, S. M., & Rezaei, F. (2012). 3-D stability analysis and design of the primary support of Karaj metro tunnel: Based on convergence data and back analysis algorithm. Engineering geology, 141, 141-149.
- Dehghan, A. N. (2020). Influence of Forepoling Umbrella on the Settlements Induced by Shallow Urban Tunneling. Geotechnical and Geological Engineering, 38, 5005-5022.
- Fang, Q., Zhang, D., & Wong, L. N. Y. (2012). Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground. Tunnelling and Underground Space Technology, 29, 10-30.
- Guan, Y. P., Zhao, W., Li, S. G., & Zhang, G. B. (2014). Key techniques and risk management for the application of the Pile-Beam-Arch (PBA) excavation method: A case study of the Zhongjie subway station. The Scientific World Journal, 2014.
- Gong, W., Luo, Z., Juang, C. H., Huang, H., Zhang, J., & Wang, L. (2014). Optimization of site exploration program for improved prediction of tunneling-induced ground settlement in clays. Computers and Geotechnics, 56, 69-79.
- Hasanipanah, M., Noorian-Bidgoli, M., Armaghani, D. J., & Khamesi, H. (2016). Feasibility of PSO-ANN model for predicting surface settlement caused by tunneling. Engineering with Computers, 32(4), 705-715.
- Heidari, S. R., Zare, S., Mirzaei, N. H., & Foroughi, M. (2013). Numerical Study of Face Pressure Effect on Surface Settlement in Soft Ground Mechanized Tunneling-A Case Study: Tehran Metro Line 7.
- Kivi, A. V., Sadaghiani, M. H., & Ahmadi, M. M. (2012). Numerical modeling of ground settlement control of large span underground metro station in Tehran Metro using Central Beam Column (CBC) structure. Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 1-9.
- Loganathan, N., & Poulos, H. G. (1998). Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 124(9), 846-856.
- Liu, X., Liu, Y., Yang, Z., & He, C. (2017). Numerical analysis on the mechanical performance of supporting structures and ground settlement characteristics in construction process of subway station built by Pile-Beam-Arch method. KSCE Journal of Civil Engineering, 21(5), 1690-1705.
- Sadeghi, M., Pourhashemi, S. M., Dehghan, A. N., & Ahangari, K. (2016). The Effect of Excavation Progress on the Behavior of Hakim Highway Tunnel Using Geotechnical Instrumentation. In ITAAITES World Tunnel Congress (pp. 22-28).
- Panet, M. 1995. Le Calcul des Tunnels par la Méthode Convergence-Confinement. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. (in French)

- Tehran Urban and Suburban Railways Organization (TUSRC) (2017). Report of Engineering Geology and Geotechnical; Abshenasan Station-Line 6 (In Persian).
- Tehran Urban and Suburban Railways Organization (TUSRC) (2018). Report of Design and Construction Method for the Abshenasan Station (Z6)-Line 6 (In Persian).
- Wu, D., Deng, T., Zhao, R., & Wang, Y. (2018). THM modeling of ground subsidence induced by excavation of subway tunnel. *Computers and Geotechnics*, 94, 1-11.
- Zhou, M., Wang, F., & Du, Y. J. (2018, May). Numerical Modeling on Localized Ground Subsidence Induced by the Tunneling in Sand. In *GeoShanghai International Conference* (pp. 84-92). Springer, Singapore.
- Zhang, C., Zhang, D., & Wang, M. (2007). Analysis of Ground Subsidence Induced by Shallow-Buried Tunnel Construction and its Control Techniques. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26, 3601-3608.

Feasibility Study of New Shallow Tunneling Method for Construction of a Subway Station in Tehran Alluvial Condition

S. Amiri¹; A.N. Dehghan^{2*}

- 1- PhD Student in Mining Engineering; Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, sina.amiri@srbiau.ac.ir
2- Assistant Professor; Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, a.dehghan1984@srbiau.ac.ir

Received: 27 May 2020; Accepted: 20 Oct 2020
DOI: 10.22044/tuse.2020.9714.1395

Keywords

Shallow tunneling method
Ground subsidence
Numerical modeling
Subway station
Tehran alluvium

Final English Extended Abstract

Summary

In recent years, by growing demand for transportation in metropolises, the application of tunnels has become increasingly common, particularly to provide sufficient space to solve traffic problems. Therefore, tunnels have important or perhaps key role in the redevelopment of urban areas. On the other hand, tunnel construction in urban areas also creates problems as the main concerns of tunnel construction in populous regions are the excavation instability and uniform or non-uniform ground subsidence, which may lead to distress beneath surface structures' foundation and cause cracks or inclination in adjacent buildings and facilities on the ground surface. For this purpose, the choice of the optimal method for construction of underground spaces such as tunnels and subway stations should be considered. A new shallow tunneling method (STM) has been widely used in China for subway station construction. The STM is a concept or philosophy for tunnelling in soft ground rather than a set of excavation and support techniques. It is different from the NATM with regard to the design philosophy, although the former also adopts some of the widely used techniques such as sequential excavation, ground reinforcement, shotcreting, monitoring as in the NATM. In the present study, the feasibility of implementing the STM for the Abshenasan (Z6) subway station construction in geological conditions of Tehran alluvium has been conducted numerically based on the evaluation of deformation and subsidence of the ground surface. The numerical modeling process has been performed in two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) forms using Plaxis finite element software.

Introduction

Choosing the proper excavation method for large tunnels in soft ground, especially in urban areas, is of particular importance. Lack of attention to this issue can certainly lead to deformation of the surface, and consequently, serious damage to the adjacent surface and subsurface structures. Therefore, it is important to provide an optimal way to construct underground spaces that do not have the deficiencies of current methods and are acceptable in terms of speed of implementation and environmental compliance.

Methodology and Approaches

3D numerical modeling of the effect of pile and rib method for the STM has been conducted in this study to investigate the deformation and surface subsidence in soft ground using Plaxis 3D finite element software.

Results and Conclusions

The results obtained from numerical modeling of the STM show a significant reduction in the deformation and surface subsidence compared to the traditional pile and rib method, so that the estimated maximum subsidence at the ground surface is about 6.09 mm and is related to the front of the face excavation. This amount of deformation and

displacement behind the face excavation is recorded at a distance of approximately one time the width of the station at about 3.52 mm. In fact, with the implementation of the STM for the Z6 station, the deformation and displacement of the ground occur at a lower rate than the pile and rib method, resulting in a reduction of maximum subsidence on the ground surface.
