



دوره ششم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۱، صفحه ۵۲ تا ۶۷



ارزیابی نشـست سـطح زمین ناشی از تونلسازی بهروش حفاری مرحلهای در زمینهای نرم

ميثم آقاجري، علىنقى دهقان^{٢*}، سيد حميد لاجوردي^٣

۱- دانشجوی دکتری؛ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران ۲- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ٣- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

يذبرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۱

در بافت : ۱۴۰۱/۰۶/۰۱؛

امروزه نشست سطح زمین در محیطهای شهری یکی از مسائل مهم در حوزه تونلسازی در زمینهای نرم محسوب	چکیدہ
میشود. عدم توجه کافی به طراحی یک روش حفاری مناسب می تواند منجر به ناپایداری فضای زیرزمینی و در	
نتیجه ایجاد نشست در سطح زمین و بدنبال آن آسیب جدی به سازه های مجاور گردد. مطالعه حاضر با تمرکز بر	
روی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی زمین و نیز شرایط هندسی تونل خط ۶ متروی تهران در بخش شمالی، سعی در	
طراحی و ارائه یک روش حفاری مناسب در کنترل نشست سطح زمین دارد. از اینرو به کمک نرم افزار المان محدود	
Plaxis 3D Tunnel، با شبیه سازی فرآیند حفاری تونل خط ۶ متروی تهران و مقایسه نتایج با داده های ابزار دقیق،	
نشست سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفت. از میان روشهای حفاری مورد بررسی (برش حلقهای RC، دیافراگم	
میانی CD و طاق و پاطاق T&B)، روش برش حلقهای از عملکرد بهتری در کنترل نشست سطح زمین برخوردار می-	
باشد. همچنین با بررسی توالی حفاری و فواصل سینه کار حفاری در روش برش حلقهای، مشخص شد با کاهش حجم	
حفاری و افزایش فاصله میان سینه کارهای مختلف، اندازه زونهای توزیع تنش و تداخل آنها بر یکدیگر در اطراف تونل	
کاهش یافته و در نتیجه نشست کمتری در سطح زمین ایجاد می گردد.	
تونلسازی، روش حفاری مرحلهای، نشست زمین، شبیهسازی عددی، نرم افزار المان محدود Plaxis 3D Tunnel	واژگان کلیدی

۱– مقدمه

با توسعه سریع شهرها، توسعه و بهرهبرداری از فضاهای زیرزمینی به عنوان عامل بسیار مهمی در توسعه پایدار جامعه شهری تبدیل شده است. زمانیکه یک تونل و یا فضای زیرزمینی حفاری میشود، تغییر در میدان تنش برجای حاکم در محیط منجر به جابجایی و نیز نشست سطحی زمین شده و در نتیجه ممکن است خطرات جدی برای سازههای مجاور ایجاد نماید. توزیع تنش ایجاد شده در اثر حفر فضاهای زیرزمینی سبب ایجاد جابجاییها در فضای زیرزمینی و سرانجام باعث نشست در سطح زمین می شود. از اینرو نیاز به کنترل نشست در سطح زمین و پایداری فضاهای زیرزمینی در مناطق شهری از اهمیت قابل توجهی برخوردار میباشد [۱] و [۲]. طراحی و

ساخت تونل نیاز به استفاده از تکنیکها و تکنولوژیهای مناسب در طول همه مراحل پروژه تونل میباشد. انتخاب یک روش حفاری مناسب برای پروژههای تونلی در محیط شهری و خصوصا در زمین-های نرم بهعنوان یک فاکتور کلیدی برای اجرای موفق پروژه محسوب میشود. هزینه و زمان ساخت تونلها بشدت متاثر از روش حفاری می باشد [۲]، [۳] و [۴]. در طول زمان انتخاب روش حفاری، نیاز به در نظر گرفتن ملاحظات مختلفی از جمله مسائل عملیاتی، اقتصادی و زیست محیطی در حوزه تونلسازی میباشد. نشست سطح زمین ناشی از عملیات تونلسازی بر مبنای روشهای مختلف حفاری و ساخت استفاده شده برای مقاطع عرضی مختلف تونل تغییر می-کند. حتى در مقاطع عرضى يكسان، روشهاى حفارى و ساخت

^{*}نویسنده مسئول: استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات- انتهای بزرگراه شهید ستاری، میدان دانشگاه، بلواز شهدای حصارک، دانشگاه آزاد اسلامي واحد علوم و تحقيقات، دانشكده فني و مهندسي، گروه مهندسي معدن- تلفن: ۲۱۴۴۸۶۸۴۰۴، فكس: ۲۱۴۴۸۶۸۴۲۱، كد پستي: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵ يست الكترونيك: a.dehghan@srbiau.ac.ir

مختلف منجر به نشستهای متفاوتی می شوند. روشهای حفاری و ساخت مختلف اثرات مهمی بر روی میزان نشست سطح زمین دارند. انتخاب روش حفاری و شیوه توالی حفاری سینهکار یک تونل، بایستی اساسا بر پایه فعل و انفعالات پیچیدهای باشد که میان برخی فاکتورهای مختلف از جمله ایمنی، هزینه و ملاحظات زمان بندی، رخ میدهد [۵]. از آنجایی که تونلسازی در محیط شهری در شرایط کم عمق، زمینهای ضعیف و عبور از مناطق پرجمعیت و حضور سازه-های سطحی و زیرسطحی حساس انجام می گیرد، محدودیت نشست-های سطحی در طول فرآیند تونلسازی ایمن و مناسب بهعنوان نگرانی اصلی در همه مشخصههای روشهای طراحی و ساخت مطرح می باشد [۳] و [۶]. در طراحی روش حفاری تونل، تنشهای برجا، فشار آبحفرهای، مقاومت و پارامترهای تغییر شکل توده خاک به عنوان دادههای ورودی مورد نیاز است. برای انتخاب روش حفاری تونل، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری و کنترل نشست سطح زمین، مقادیر واقعی این پارامترها ضروری بوده و بدون در نظر گرفتن مقادير واقعي، مراحل طراحي مهندسي ممكن نيست [۷] و [۸]. در سالهای اخیر، روش حفاری مرحلهای (SEM/NATM) به-عنوان یکی از پرکاربردترین روش به منظور حفاری و اجرای ایمن فضاهای زیرزمینی با روباره کم و شرایط زمین شناسی دشوار معرفی شده است. در این روش یک تنوع زیادی از روشهای مختلف حفاری تونل در نظر گرفته شده است که در شرایط زمین شناسی مختلف می تواند به واسطه انعطاف پذیری مناسب در روش حفاری و نگهداری فضای زیرزمینی بکار گرفته شود. بنابراین برای بررسی و مقایسه اثر این روشها بر روی تغییر شکل و نشست سطحی زمین حائز اهمیت مى باشد. موضوع نشست سطحى زمين ناشى از حفارى تونل با توجه به اهمیتی که دارد همواره از سوی محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است تا با اتخاذ روشهای مناسب، مقدار آن قبل از شروع عملیات حفاری و ساخت برآورد کنند. در زمینه پیشبینی تنشها و تغییر شکلهای ایجاد شده ناشی از حفر تونل، تحقیقات متعددی صورت گرفته و روشهای مختلفی ارائه شده است که برخی از آنها بر مبنای اصول محاسباتی و براساس خواص زمین و برخی مبتنی بر مشاهدات تجربي مي باشند [٩]، [١٠]، [١٢]، [١٢]، [١٣] و [10]

روشهای تجربی، تحلیلی و عددی بهعنوان مهمترین روشهای ارزیابی و پیشبینی میزان نشست سطح زمین ارائه شدهاند. از این میان، روش عددی با استفاده از کدهای محاسباتی و بستههای نرم-افزاری امکان مدلسازی فرآیند اجرایی تونل، با در نظر گرفتن تأثیر بر سازههای مجاور را امکانپذیر میسازد. مدلسازی عددی به عنوان عامل و ابزاری برای پیشبینی رفتار زمین در هنگام حفاری به کار گرفته میشود. از مزایای استفاده از روش عددی میتوان به پیش-بینی کلی رفتار زمین و کم هزینه بودن آن اشاره کرد [17]، [۱۲]،

[۱۸]، [۱۹]، [۲۰]، و [۲۱].

یکی از مسائل مهم در کنترل نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی در محیطهای شهری، انتخاب روش حفاری مناسب با توجه به شرایط زمینشناسی است. در این مطالعه تلاش شده است تا بر مبنای مدلسازی عددی سه بعدی از شرایط اجرای بخش شمالی تونل خط ۶ متروی تهران، میزان نشست سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفته و نهایت یک مدل بهینه برای انتخاب روش حفاری، سکانس حفاری و فاصله میان مراحل مختلف حفاری سینه کار تونل ارائه شود. مدل مورد نظر میتواند برای تونلسازی شهری در زمینهای نرم به منظور کنترل تغییرشکلها و نشستهای سطحی زمین مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مشخصات پروژه ۲-۱-معرفی

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 شهرری آغاز شده و با عبور از مناطق پرجمعیت شهر تهران به منطقه کن در شمال غرب تهران ختم می گردد (**شکل ۱**). روباره تونل در بخش شمالی خط ۶ از ۹ تا ۲۴ متر متغیر میباشد. محدوده مورد مطالعه در بخش شمالی خط ۶، در محدوده خیابان پیامبر و در بخش غربی ایستگاه *V6* (شهید ستاری) قرار دارد (کیلومتراژ ۴۰۰+۲۵). روش حفاری و ساخت این بخش از تونل به صورت مرحلهای است.

۲-۲- ویژگیهای زمینشناسی و ژئوتکنیکی

بر پایه مطالعات زمینشناسی مهندسی و ژئوتکنیکی انجام شده در مسیر تونل، خاکهای دربرگیرنده عمدتا از نوع GM,GC,SMوGG, SM می باشد. به طورییکه بخش درشت دانه خاک بیشتر از ماسه و شن و بخش ریز دانه آن از رس و سیلت تشکیل شده است. در بین این خاکها، لنزهای متشکل از رس ماسه دار (CL) یاشن بد دانه بندی شده (GP) و غیره نیز دیده میشود. به طور کلی در محدوده مورد مطالعه دو نوع لایه خاک شناسایی شده است. لایه اول تا عمق حدود SC متر از لایه های متناوب ماسه رس و لای دار همراه با شن (-SC(MC) و ماسه رس دار همراه با کمی شن (SC) با لنزهایی از شن لای دار (GM) همراه با ماسه تشکیل شده است. لایه دوم از عمق ۵ ماسه (GM) می ماسه تشکیل شده است. لایه دوم از عمق ۵ ماسه (GM) می ماسه تشکیل شده است. لایه دوم از عمق ۵ ماسه (GM) می ماسه تشکیل شده است. لایه دوم از عمق ۵ ماسه (GC-GM) می ماسه دارای شن رس و لای دار به همراه ماسه (GC-GM) می محدوده، تراز تونل بالاتر از سطح ایستابی قرار دارد. ماسه (GT-GM) می محدوده، تراز تونل بالاتر از سطح ایستابی قرار دارد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایههای خاک در جدول ۱ ارائه شده است [TT].



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعه بر روی نقشه پلان خط ۶ متروی تهران

	لايه اول	
$\varphi=\varUpsilon\varUpsilon ^{\mathbf{o}}$	زاويه اصطكاك داخلى	
$C=\bullet/\Upsilon r kg/cm^2$	چسبندگی	
$\gamma_m = 19 \text{ gr/cm}^3$	وزن مخصوص طبيعي	
$ u = \cdot / \Upsilon$	نسبت پوآسون باربرداری و بارگذاری مجدد	
E_s =47. kg/cm ²	مدول الاستيسيته سكانتى	•-10 m
$E_{ur} = 1$ ff. kg/cm ²	مدول الاستیسیته باربرداری و بارگذاری مجدد	
$m = \cdot / \Delta$	توان سطح تنش سختی	
$\psi=\textbf{\Upsilon}^\circ$	زاويه اتساع	
	لايه دوم	
$\phi=\varUpsilon {\cal F}^{o}$	لایه دوم زاویه اصطکاک داخلی	_
φ = ٣۴° C=•/۲۴ kg/cm ²	لایه دوم زاویه اصطکاک داخلی چسبندگی	
$\phi = \texttt{TF}^{\circ}$ $C = \cdot/\texttt{TF} \text{ kg/cm}^{2}$ $\gamma_{m} = \texttt{T} \cdot \text{ gr/cm}^{3}$	لایه دوم زاویه اصطکاک داخلی چسبندگی وزن مخصوص طبیعی	
$\phi = \texttt{rfo}$ $C = \cdot/\texttt{rfkg/cm^2}$ $\gamma_m = \texttt{rfgr/cm^3}$ $v = \cdot/\texttt{rf}$	لایه دوم زاویه اصطکاک داخلی چسبندگی وزن مخصوص طبیعی نسبت پوآسون باربرداری/بارگذاری مجدد	
$\frac{\phi = r \varphi^{\circ}}{C = \cdot / r \varphi kg/cm^{2}}$ $\frac{\gamma_{m}}{r} \varphi_{m} = r \varphi gr/cm^{3}}{r}$ $\frac{v = \cdot / r}{E_{s}} = A \varphi kg/cm^{2}}$	لایه دوم زاویه اصطکاک داخلی چسبندگی وزن مخصوص طبیعی نسبت پوآسون باربرداری/بارگذاری مجدد مدول الاستیسیته سکانتی	 ۱۵-۴۰ m
$\phi = r \varphi^{0}$ $C = \cdot / r \varphi^{0}$ $\gamma_{m} = r \cdot gr/cm^{3}$ $v = \cdot / r$ $E_{s} = Ar \Delta kg/cm^{2}$ $E_{ur} = r \Delta \cdot \Delta kg/cm^{2}$	لایه دوم زاویه اصطکاک داخلی چسبندگی وزن مخصوص طبیعی نسبت پوآسون باربرداری/بارگذاری مجدد مدول الاستیسیته سکانتی مدول الاستیسیته باربرداری و بارگذاری مجدد	 ۱۵-۴۰ m
$ \begin{split} & \phi = \texttt{TFo} \\ \hline C = \cdot/\texttt{TF kg/cm}^2 \\ \hline \gamma_m = \texttt{T} \cdot \texttt{gr/cm}^3 \\ \hline v = \cdot/\texttt{T} \\ \hline E_s = \texttt{ATA kg/cm}^2 \\ \hline E_{ur} = \texttt{TA A kg/cm}^2 \\ \hline m = \cdot/\texttt{A} \end{split} $	لایه دوم زاویه اصطکاک داخلی چسبندگی وزن مخصوص طبیعی نسبت پوآسون باربرداری/بارگذاری مجدد مدول الاستیسیته سکانتی مدول الاستیسیته باربرداری و بارگذاری مجدد یوان سطح تنش سختی	 \∆_¥• m

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی لایههای خاک در محدوده تونل [۲۲]

۲-۳- روش حفاری

مقطع تونلهای ریلی با توجه به گاباری قطار تعیین می شود. برخلاف تونلهای مکانیزه که سطح مقطع اکثر آنها دایرهای است، حفاری سنتی و به عبارتی مرحلهای در انتخاب شکل مقطع انعطاف پذیر است. لذا برای حفاری بخش میانی و شمالی خط ۶ متروی تهران،

مطابق آنچه در شکل ۲ مشاهده می شود، مقطع نعل اسبی انتخاب شده است. از نظر حجم حفاری در واحد طول تونل، سطح مقطع نعل اسبی ضمن تامین گاباری مورد نیاز، در مقایسه با مقطع دایرهای تونل مکانیزه بسیار بهینهتر است [۲۳].



شکل ۲- مقطع تونل خط ۶ مترو تهران-بخش شمالی [۲۳]

رود و به مرور قاب نگهداری اولیه اطراف تونل تکمیل می شود. با پیشروی سینه کار اول، در سینه کار دوم، هسته مرکزی پله فوقانی حفاری می شود. در مرحله بعد نیز، سینه کار سوم در جدار چپ پله تحتانی باز خواهد شد تا به این طریق، فضای لازم برای نصب پایه چپ لتیس گیردر مهیا گردد. همزمان با پیشروی این سینه کار، برای نگهداری اولیه فضای حفاری شده، از لتیس و دو لایه وایرمش و شاتکریت استفاده می شود. به علاوه، در شرایط نامساهد زمین شناسی، بسته به نتایج ابزاردقیق و در صورت بالا بودن نرخ نشست، امکان استفاده ار کف بندی موقت بخش فوقانی تونل نیز پیشبینی می شود. با فاصله از سینه کار سوم، در سمت مقابل تونل، سینه کار چهارم فعال شده و محل نصب پایه سمت راست لتیس گیردر حفاری می-شود. این بخش از دیواره تونل نیز با نصب قطعه دیگری از لتیس-گیردر و دو لایه وایرمش و شاتکریت نگهداری می شود. آخرین مقطع تونل، هسته مرکزی پله تحتانی است که سینه کار پنجم را تشکیل مىدهد. با حفارى اين بخش، تمام مقطع تونل آزاد مى شود. آخرين قطعه لتیس گیردر، کف بند تونل است که با نصب آن، قاب نگهداری موقت تونل کامل می شود. در نهایت پس از اجرای بتن مگر در کف، آرماتوربندی و بتن ریزی درجا با کمک قالبهای متحرک، پوشش نهایی تونل اجرا می شود [۲۳]. روش حفاری مرحلهای مورد استفاده در این طرح، به صورت برش حلقهای RC (Ring Cut) است. در این روش بر اساس مقطع تونل و شرایط ژئوتکنیکی زمین، سطح مقطع تونل به چند سطح مقطع کوچکتر تقسیم و سپس هر یک از این مقاطع به نوبت حفاری و نگهداری می شوند (شکل ۳). همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقطع تونل به دو پلهی فوقانی و تحتانی متشکل از ۵ سینه کار مجزا تقسیم شده است. طول گام حفاری به طور معمول یک متر در نظر گرفته شده و حفاری در این سینه کارهای پنج گانه، با فاصلهی طولی یک یا چند گام (حدکثر معادل یک برابر شعاع تونل) به صورت همزمان اجرا می شود. در مرحله اول جداره پله فوقانی تونل بع طول یک گام حفاری میشود. سینه کار اول تنها سینه کاری است که حفاری آن در زمین بدون نگهداری انجام می-شود. در زمینهای دشوار و ریزشی، پیش از اولین گام حفاری، سقف تونل به طور موقت با استفاده از روشهای پیش نگهداری از جمله فورپولینگ، پایدار می شود. پس از حفاری تاج تونل، فضا برای نصب سیستم نگهداری اولیه باز می شود. لذا در مرحله بعد، سقف تونل با استفاده از لتیس گیردر (قاب مشبک فولادی) و دو لایه وایرمش (توری فلزی) و شاتکریت پایدار می شود. از این مرحله به بعد، تمام حفاریها در زیر سیستم نگهداری اولیه و با امنیت بیشتری پیش می-



شکل ۳- مراحل حفاری و نگهداری تونل به روش برش حلقهای [۲۳]

۲-۴- سیستم نگهداری

همانطور که در **شکل ۲** نشان داده شده است، عرض و ارتفاع مقطع حفاری تونل به ترتیب ۹/۹۵۰ و ۹/۴۷۸ متر است. از دو نوع سیستم نگهداری اولیه و نهایی استفاده شده است. ضخامت سیستم نگهداری اولیه ۳۰ سانتی متر و ضخامت سیستم نگهداری نهایی ۵۰ سانتی متر است. در این مطالعه با توجه به بررسی نشست سطح زمین حین عملیات حفاری، تنها اثر نصب سیستم نگهداری اولیه (دائمی و موقت) مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات مربوط به سیستم نگهداری دائمی و موقت در نظر گرفتهشده برای تونل در **جدول ۲**

ارائه شده است. همچنین مشخصات مقاومتی پوشش نگهداری دائمی و موقت در جدول ۳ نشان داده شده است [۲۳]. با توجه به روش حفاری تونل (برش حلقهای) از سیستم نگهداری موقت (تخریبی) استفاده نشده است. همچنین از آنجایکه سیستم نگهداری نهایی تونل در فواصل خیلی طولانی از حفاری تونل، اجرا می گردد، از اینرو در تحلیل حاضر لحاظ نشده است.

پوشش (سیستم نگهداری) پیشنهادی	كلاس		
۳۰ سانتیمتر شاتکریت همراه ۲ لایه وایرمش و لتیس گیردر سه بار از نوع فولاد AIII	سیستم نگهداری اولیه تونل		
(Φ = ۲۰/۲۸) با فاصلهداری ۱ متر	(اوليه و اصلي)	محدوده خيابان	
۲۵ سانتیمتر شاتکریت همراه ۲ لایه وایرمش و لتیس گیردر سه بار از نوع فولاد AIII	سیستم کفبند و شاخ بزیها	0,2, 0,0,0	
(Φ =۲۰/۲۵) با فاصلهداری ۱ متر	(موقت و تخریبی)		

جدول ۱- سیستم نگهداری اولیه و موقت تونل [۲۳]

جدول ۲- مشخصات سیستم نگهداری اولیه و موقت تونل [۲۳]

SHOT-30cm پوشش اولیه (دائمی)				
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	
۲۰MPa	مقاومت فشاری (${f f}_{ m c}$)	$\gamma/\gamma \epsilon e^{\gamma} kN/m^2$	مدول الاستيسيته (E)	
۳۰ cm	ضخامت (Thickness)	۶/۴۱ e ^{+۶} kN	سختی نرمال (EA)	
•/۵	فاکتور ترکخوردگی (Crackfactor)	$r/\epsilon \cdot e^{+\epsilon} kN.m^2$	صلبیت خمشی (EI)	
SHOT-25cm پوشش موقت (تخریبی)				
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	
۲۰MPa	${ m f'_c}$ مقاومت فشاری	$\gamma/1$ f $e^{+\gamma}$ kN/m ²	مدول الاستيسيته (E)	
۲۵ cm	ضخامت Thickness	$\delta/rr e^{+\delta} kN$	سختی نرمال (EA)	
• /۵	فاکتور ترکخوردگی Crackfactor	1/3 e ⁺⁴ kN.m ²	صلبیت خمشی (EI)	

۲-۵- ابزاربندی و رفتارنگاری سطح زمین

در مسیر تونل خط ۶ متروی تهران از دو نوع ابزار متفاوت برای اندازه گیری نشست سطح زمین (پینهای نشست سنجی، GLP) و نشست ساختمان ها (پینهای ترازیاب ساختمانی، BLP) استفاده شده است. این ابزارها به طور مستمر و در زمانهای معینی توسط دوربینهای دقیق ترازیابی (توتال استیشن) قرائت میشوند. محل نصب پینهای ترازیابی ساختمانها با توجه به نتایج مطالعات ارزیابی ریسک تعیین شدهاند. پینهای نشستسنجی سطحی زمین نیز

عموما بر روی محور تونل با فاصلهداری ۲۵ متری در طول مسیر تونل نصب شدهاند. برای رسم پروفیل عرضی نشست زمین، در فواصل ۱۰۰ متری یا در نقاط حساس مسیر، علاوه بر پینهای مرکزی، دو پین در دو سمت راست و چپ محور تونل نصب شده است. نمونهای از نقشه جانمایی پینهای نشست سنجی زمین در **شکل ۴** نشان داده شده است [۲۴]. لازم به ذکر است در محدوده مورد مطالعه از پین-های نشست سنجی ساختمانی استفاده نشده است.



شکل ۴. نقشه جانمایی (الف) و مقطع عرضی (ب) ابزارهای نشست سنجی در سطح زمین [۲۴]

یروفیل نشست طولی حاصل از قرائت نقاط نشست سنجی در

محدوده مورد مطالعه تونل در شکل ۵ نشان داده شده است [۲۴]. با

پیشرفت عملیات حفاری، مقادیر نشست سطحی ثبت شده توسط

نقاط نشست سنجى افزايش يافته است. حداكثر مقدار نشست ثبت

شده توسط یین مرکزی (بر روی محور تونل) به مقدار ۲۵/۷۰

میلیمتر است. حداکثر مقادیر نشست پینهای جانبی (چپ و راست)

تقریبا یکسان و بهترتیب در حدود ۱۴/۸۷ و ۱۳/۴۰ میلیمتر است. در پروژه تونل خط ۶ متروی تهران-بخش شمالی، بر اساس شرایط زمینشناختی و ژئوتکنیکی، ژئومتری تونل، روش ساخت، الزامات

روش مرحلهای (SEM/NATM)، الزامات سازهای و محدودیتهای خاص پروژه، مقادیر ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلیمتر نشست سطحی، به ترتیب بهعنوان سطح هوشیاری (level alert، ۷۵ درصد نشست پیش بینی شده)، سطح آماده باش (alarm level، ۵۸ درصد نشست پیش بینی شده) و سطح خطر و اقدام (action level، ۱۰۰ درصد نشست پیش بینی شده) برای مقطع نهایی تونل تعریف شده است [۲۴].



شکل ۵- منحنیهای نشست طولی حاصل از داده های ابزار دقیق در مقطع CSLP-P-N025 (کیلومتراژ ۲۵+۲۵+۲) مسیر تونل

۳- طراحی روش حفاری تونل و ارزیابی نشست سطح زمین

۳-۱- مدلسازی عددی و صحتسنجی

به منظور طراحی روش حفاری مرحله ای و ارزیابی نشست سطح زمین در مسیر قطعه شمالی خط ۶ متروی تهران، از مدلسازی عددی به روش المان محدود استفاده شده است. هدف از تحلیل المان محدود در مدلسازی اندرکنش خاک و سازه، بررسی نشست سطح زمین ناشی از حفاری و اجرای تونل است. همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، روش حفاری تونل به صورت مرحله ای و برش حلقه ای است شد، روش حفاری تونل به صورت مرحله ای و برش حلقه ای است شد، روش حفاری تونل به صورت مرحله ای و برش حلقه ای است زونل به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم افزار المان محدود پلکسیس رای تحلیل تغییر شکل و پایداری در پروژه های مهندسی

ژئوتکنیک کاربرد دارد. معمولا در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدلسازی رفتار غیر خطی و وابسته به زمان خاکها بسته به هدف مورد نظر لازم است. با این نرمافزار میتوان خاکبرداری و خاکریزی مرحلهای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المانهای مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مدلسازی نمود.

از اینرو مدلسازی عددی مراحل حفاری و اجرای تونل بهصورت زیر انجام شده است:

الف) ابعاد مدل: طول (X) و عرض (Z) مدل ۵۰ متر و ارتفاع (Y) آن ۴۰ متر لحاظ شده است. ابعاد مدل در بخشهای تحتانی، چپ و راست تونل در حدود ۴ برابر شعاع فضای زیرزمینی در نظر گرفته شده است (**شکل** ۶). ابعاد در نظر گرفته شده به گونهای است که از تأثیر شرایط مرزی غیر واقعی به دور میباشد. در **شکل** ۶

مشخصات هندسه مدل ساخته شده به همراه مش بندی، ارائه شده است. همانگونه که در شکل P نشان داده شده است، تونل در عمق حدود ۲۰ متری از سطح زمین قرار داشته و میزان روباره آن ۱۱/۵۰ متر متر می باشد. نسبت ارتفاع روباره (H) به قطر تونل (D) بیشتر از ۱ است. محور Z در امتداد محور تونل و سینه کار حفاری لحاظ شده است.

ب) حفاری: اجرای تونل مطابق با مراحل حفاری و نگهداری ارائه شده در بخش ۲-۳، مدل شده است.

ج) شرایط مرزی: گیرداریهای استاندارد به صورت مفصلی (ثابت) در کف مدل و نیز به صورت غلتکی در کنارههای قائم مدل در نظر گرفته شده است. جهت مدلسازی ترافیک عبوری از سطح، بار گسترده ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع [۲۵] در عرض خیابان در نظر گرفته شده است (شکل ۶).

د) پارامترهای مصالح: مدل رفتاری خاک سخت شونده (Hardening soil) با مشخصات مهندسی حاصل از مطالعات مطابق جدول ۱ و مشخصات مقاومتی سیستم نگهداری (رفتار الاستیک) مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. مدل خاک سخت شونده نسبت به مدل موهر کولمب برازش بهتر و پاسخ واقع گرایانهتری را برای عموم مصالح خاکی به ویژه هنگام باربرداری در مسائلی همچون خاکبرداری، تونلسازی و حفاری فضاهای زیرزمینی به دست میدهد.

ه) تنش برجا: تنش 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.

و) مشبندی: المانهای حجمی مثلثی شکل ۱۵ گرمای برای مش-بندی مدل مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج حاصل از مدلسازی عددی مراحل حفاری و ساخت تونل در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است حداکثر جابجایی کل در مدل برابر ۲۳/۴۷ میلیمتر است. همچنین حداکثر جابجایی قائم (شکل ۷ ب)، جابجایی افقی عمود بر محور تونل؛ X (شکل ۷ ج) و جابجایی افقی در سینه-کار؛ Z (شکل ۷ د) بهترتیب ۲۳/۴۷ و ۵/۵۶ و ۱۱/۰۷میلیمتر است. حداکثر جابجایی قائم با یکدیگر برابر هستند به طورئیکه حداکثر مقدار جابجایی در مدل مربوط به جابجایی قائم بوده و این مقدار جابجایی در راستای محور تونل و در

بالای سقف آن است (شکل ۷ ب). این مقدار جابجایی با حرکت به سطح زمین به مقدار بسیارکمی کاهش یافته (ناشی از روباره کم) و نهایتا مقدار آن بهصورت گودال نشست در شکل ۸ به میزان ۲۲/۲۴ بدست آمده است.



در شکل ۹ نیز مقایسهای از نتایج حاصل از دادههای ابزار دقیق و مدلسازی عددی بهصورت منحنیهای طولی نشان داده شده است. همانگونه که در اشکال ۸ و ۹ نشان داده شده است، منحنیهای نشست حاصل از مدلسازی عددی و دادههای ابزاردقیق از تطابق خوبی برخوردار هستند. بهعبارت دیگر، حداکثر نشست حاصل از مدلسازی عددی مراحل مختلف تونل (۲۲/۲۴ میلیمتر) با حداکثر مقدار نشست حاصل از نتایج ابزاردقیق (۲۵/۷۰ میلیمتر) در یک محدوده قابل قبولی (حدود ۱۵ درصد اختلاف) قرار گرفته است که نشان دهنده تطابق خوب نتایج مدلسازی عددی با نتایج ابزاردقیق میباشد.

بنابراین می توان نتیجه گرفت که با توجه به تایید صحت مدل عددی ساخته شده برای شرایط موجود تونل خط ۶ مترو در بخش شمالی، این مدل توسعه یافته می تواند به منظور شبیه سازی اثر حفاری و اجرای تونل بر نشست سطح زمین در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد.



شکل Y- نتایج مدلسازی عددی؛ الف) جابجایی کل، ب) جابجایی قائم Y، ج) جابجایی افقی محور X و جابجایی افقی محور Z



شکل ۸- گودال نشست سطحی بدست آمده از مدلسازی عددی و دادههای ابزاردقیق



شکل ۹- مقایسه نتایج نشست سطح زمین حاصل از دادههای ابزار دقیق و مدلسازی عددی

۲-۲- انتخاب روش حفاری

تقسیم بندی محدوده حفاری برای تونل های بزرگ مقطع به منظور کاهش زون آسیب و نشست سطح زمین ضروری میباشد. حفاری تونلهای بزرگ مقطع اغلب به صورت عملیات حفاری در بخشهای فوقانی، میانی و تحتانی صورت می گیرد. نگهداری اولیه تونل به سرعت و پس از حفاری بخش مورد نظر بهمنظور تامین پایداری و ممانعت از تغییر شکل بیشتر زمین انجام می شود. یو و چرن (Yu and Chern) در سال ۲۰۰۷ [۲۶] یک دیاگرام برای انتخاب روشهای حفاری تونل بر پایه اندازه فضای زیرزمینی و نسبت مقاومت فشاری تک محوری زمین به تنش قائم ارائه دادند (شکل ۱۰). با قرار دادن شرایط تونل خط ۶-بخش شمالی بر روی دیاگرام مذکور، روش Top) T&B حفاری تمام مقطع FF (Full Face) ویا طاق و پاطاق (Full Face) حفاری تمام and Bench) برای بیشتر مسیر تونل مناسب میباشند. از آنجایی که روش حفاری به کار گرفته شده برای ساخت تونل (برش حلقهای در ۵ مرحله) از کنترل مناسبی در تغییرشکل و نشست سطح زمین برخوردار بوده است، علاوه بر روش طاق و پاطاق، از روش دیافراگم مرکزی یا میانی CD (Central Diaphragm) در چهار مرحله حفاری به منظور مقایسه نتایج و بررسی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. از اینرو در این مطالعه روشهای حفاری طاق و یاطاق و دیافراگم میانی با استفاده از روش المان محدود به منظور مقایسه با روش حفاری برش حلقهای و انتخاب روش حفاری مناسبتر با در نظر گرفتن میزان نشست سطحی زمین مورد آنالیز و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.



مقاومت فشاری تک محوری (UCS) به تنش قائم [۲۶]

مدلهای المان محدود سه بعدی برای روشهای حفاری طاق و پاطاق و دیافراگم میانی بهترتیب در شکل ۱۱ الف و ۱۱ ب نشان داده شده است. همانگونه در شکل ۱۱ نشان داده شده است، حفاری تونل در روش طاق و پاطاق در دو مرحله و روش دیافراگم میانی در ۴ مرحله مطابق ترتیب توالی سکانسهای حفاری اتخاذ شده، انجام شده است. سیستم نگهداری اولیه تونل (دائمی و موقت) مطابق بخش شده است. سیستم نگهداری اولیه تونل (دائمی و موقت) مطابق بخش در نظر گرفته شده است. همچنین از آنجایکه سیستم نگهداری نهایی تونل در فواصل خیلی طولانی از حفاری تونل، اجرا می گردد، در تحلیل حاضر لحاظ نشده است.

نتایج بدست آمده از تحلیل سه بعدی مدلهای المان محدود مربوط به تکمیل فرآیند حفاری و اجرای سیستم نگهداری اولیه است (شکل ۱۱). پروفیلهای نشست سطحی زمین برای روشهای حفاری

طاق و پاطاق و دیافراگم میانی و مقایسه آنها با روش حفاری برش حلقهای در شکل ۱۲ نشان داده شدهاند. همانگونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، در روشهای طاق و پاطاق، دیافراگم میانی و برش حلقهای، نشست سطحی ماکزیمم بهترتیب در حدود ۳۷/۲، ۲۸/۶۵ و ۲۲/۲۴ میلیمتر بوده که مربوط به مرکز تونل هستند.

پروفیل نشست طولی برای هر سه روش در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۳ ملاحظه می شود، برای هر سه روش، نشست سطح زمین در فاصله حدود ۱/۵ الی ۲ برابر قطر تونل در جلو سینه کار شروع شده و تا ۲/۵ الی ۳ برابر قطر تونل در پشت سینه کار به مقدار حداکثر مقدار خود رسیده است. نتایج مدلسازی عددی نشست سطح زمین در تطابق خوبی با اظهارات دساری Desari و همکاران قرار دارد [۲۷]. همچنین مقدار نشست سطح زمین در محل سینه کار برای روشهای حفاری برش حلقهای، دیافراگم میانی و طاق و پاطاق بهترتیب ۱۰/۸، ۱۰/۳۰ و ۱۸/۵۴ میلیمتر بدست آمده است که در حدود یک سوم حداکثر نشست سطح زمین است و تطابق خوبی با اظهارات پانه Panet دارند [۲۸].



شکل ۱۱- مدلهای المان محدود سه بعدی تونل برای روشهای الف) طاق و پاطاق و ب) حفاری دیافراگم میانی (CD)



شکل ۱۲- پروفیلهای عرضی گودال نشست نهایی سطح زمین حاصل از سه روش حفاری برش حلقهای، طاق و پاطاق و دیافراگم



شکل ۱۳- پروفیلهای طولی گودال نشست نهایی سطح زمین حاصل از سه روش حفاری برش حلقهای، طاق و پاطاق و دیافراگم میانی

بر پایه نتایج مدلسازی عددی، میزان نشست سطح زمین در روش برش حلقهای (RC) نسبت به روشهای طاق و پاطاق و دیافراگم میانی (CD) کمتر بوده و کنترل بهتری در نشست سطح زمین دارد. از طرف دیگر، میزان نشست حاصل از روش برش حلقه ای و دیافراگم میانی کمتر از میزان نشست تراز اولیه تعیین شده (سطح هوشیاری؛ ۳۰ میلیمتر) بوده در صورتیکه میزان نشست (وش طاق و پاطاق بیشتر از این سطح و در محدوده بین Alert سطح آماده باش) و Action (سطح خطر و اقدام) قرار گرفته است. بنابراین روش RC با توجه به ظرفیت بیشتر در محدود کردن و نینترل نشست سطحی زمین و همچنین تغییر شکل تونل نسبت به مینه کار حفاری تونل منجر به کاهش تغییرشکل و جابجایی زمین در اطراف تونل می گردد، اما در عوض نیاز به مراحل بیشتر عملیات حفاری و نصب سیستم نگهداری و نیز تاخیر زمانی در بسته شدن پوشش تونل بیشتر می شود.

۳-۳- انتخاب سکانس/توالی حفاری

به منظور اجرای روش حفاری مرحلهای در یک شرایط هزینهای موثر و کارآمد، لازم است درک کاملی از اثر سکانس/توالی حفاری سینه کار بر روی کارایی ساخت تونل وجود داشته باشد. فاکتور اصلی در انتخاب سکانسهای حفاری بهینه، محدود نمودن نشست سطحی

زمین میباشد. انتخاب سکانسهای حفاری تونل وابسته به پارامترهایی همچون هندسه تونل، خصوصیات زمین، وضعیت آب-زیرزمینی و غیره میباشد. بنابراین، یک نیاز عملی برای شبیهسازی مراحل مختلف ساخت و یافتن روش ساخت بهینه تونل وجود دارد. در این مطالعه برای بدست آوردن سکانسهای حفاری بهینه جهت کنترل نشست سطح زمین، شش حالت حفاری برای تونل خط ۶-بخش شمالی بر پایه روش حفاری برش حلقهای (*RC*) با در نظر گرفتن هندسه تونل و خصوصیات لایه های خاک پیشنهاد گردید و سپس بهصورت مدلسازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱۴). در طول انتخاب سکانس حفاری بهینه، فاکتورهای مهمی همچون زمان بسته شدن حلقه نگهداری، تعداد مراحل حفاری، تقسیم بندی



شکل ۱۴- حالتهای مختلف حفاری سینه کار تونل در روش حفاری برش حلقهای (*RC*)

پروفیل عرضی نشست سطحی بدست آمده از مدلسازی عددی بهترتیب برای شش سکانس حفاری در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۵، حداقل و حداکثر نشست محاسبه شده بر روی محور تونل بهترتیب برای حالتهای (الف) و (د) میباشد. بر پایه نتایج مدلسازی عددی، توالی حفاری روش (الف) کمترین مقدار نشست را نشان میدهد که بهعنوان بهینهترین حالت حفاری برای پروژه تونل خط ۶ انتخاب می گردد. لازم به ذکر است، علاوه بر حالت الف، حالتهای ج، ب و و در محدوده نشست مجاز ۳۰ میلیمتر قرار دارند و از اینرو بهترتیب میتوانند گزینههای مورد نظر برای حفاری تونل و کنترل نشست در محدوده قابل اطمینان باشند.

همچنین نتایج نشان میدهد که در روش حفاری برش حلقه-ای، حجم حفاری، زمان بسته شدن حلقه نگهداری تونل و مرحله حفاری هسته نگهدارنده (Support core) بهعنوان مهمترین فاکتورها در کنترل تغییرشکل و نشست سطح زمین در فرآیند عملیات تونلسازی در محیط شهری محسوب میشوند. بهطوریکه با افزایش حجم حفاری (کم شدن مراحل حفاری) به منظور افزایش سرعت بسته شدن حلقه نگهداری، تغییرشکل و نشست سطح زمین

افزایش یافته است (شکل ۱۵). در زمینهای نرم افزایش سرعت بسته شدن حلقه نگهداری می تواند در اولویت نسبت به حجم حفاری کمتر قرار گیرد چرا که تاخیر در زمان بسته شدن حلقه نگهداری در این نوع زمینها، نشستهای بهمراتب بزرگتری ایجاد می گردد. در پاین پروژه (تونل خط ۶) با توجه به مقاومت نسبتا خوب زمین و حفظ پایداری سینه کار، کاهش حجم حفاری در کنترل نشست زمین موثرتر میباشد. همچنین حفاری هسته نگهدارنده بسته به حالت حفاری حلقه تونل، در مراحل پایانی، نشست سطح زمین را کاهش میدهد (شکل ۱۵، حالتهای ب و ج).

در شکل ۱۶، پروفیلهای نشست طولی سطح زمین برای هر ۶ حالت حفاری سینه کار تونل ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۱۶ ملاحظه میشود، با کاهش مراحل حفاری سینه کار و افزایش حجم حفاری و سرعت بسته شدن حلقه نگهداری تونل، نشست سطح زمین افزایش یافته است. همچنین حداکثر مقدار نشست سطحی در محل سینه کار تونل نسبت به حداکثر نشست سطح زمین در پشت سینه کار در حدود یک سوم (مطابق با اظهارت پانه [۲۸]) تا یک دوم (مطابق روابط آتول و وودمن Attewel and Woodmanl



شکل ۱۵– پروفیلهای عرضی نشست سطحی زمین برای توالیهای حفاری مختلف (شکل ۱۴) سینهکار تونل



شکل ۱۶– پروفیلهای طولی نشست سطحی زمین برای توالیهای حفاری مختلف (شکل ۱۴) سینهکار تونل

۴-۳- انتخاب فاصله بهینه میان سینه کارهای حفاری یکی از مسائل مهم در حفاری تونل به روش مرحلهای، در نظر گرفتن

فواصل بهینه سینه کارهای حفاری است. بواسطه ایجاد زون توزیع تنش در اطراف فضای زیرزمینی، عدم توجه به فواصل بهینه میان سینه کارهای حفاری، میتواند منجر به ایجاد محدوده توزیع تنش بزرگتر (بواسطه برهمکنش و تداخل میان زونهای توزیع تنش) در اطراف تونل و در نتیجه نشستهای بزرگتر در سطح زمین به همراه داشته باشد. از اینرو با درنظر گرفتن فاصله معین میان سینه کارهای مختلف، تداخل زونهای توزیع تنش و ایجاد محدودههای بزرگتر در اطراف تونل به طور چشمگیری کاهش یافته و در نتیجه منجر به محدود شدن میزان نشست سطح زمین می گردد. در این بخش، فاصله بهینه میان سینه کارهای حفاری در روش برش حلقه ای با تقسیم کردن تونل به دو بخش فوقانی (زون حفاری ۱ و ۲) و تحتانی (زون حفاری ۳، ۴ و ۵) مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارتی، به-

منظور دستیابی به نتایج با درک بیشتر، اثر فاصله حفاری بخش فوقانی (حفاری همزمان دریفتهای ۱ و ۲) با بخش تحتانی (حفاری همزمان دریفتهای ۳، ۴ و ۵) تونل بر روی نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده میتواند برای تعمیم به بخشهای کوچکتر سینهکار حفاری تونل مورد استفاده قرار گیرد.

بدین ترتیب بهمنظور بدست آوردن فاصله بهینه میان سینه-کارهای مختلف، حفاری دریفتهای بخش فوقانی تونل بدون فاصله و در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری، در جلو سینه کار دریفتهای بخش تحتانی شبیه سازی گردیدند (شکل ۱۷). در مدلسازی حفاری سینه کارهای مختلف، طول گام حفاری دریفتهای بخش فوقانی یک متر و به صورت حفاری همزمان در نظر گرفته شد.



شکل ۱۷– تصویرشماتیک از الف) پلان، ب) مقطع طولی و ج) مقطع عرضی تونل به همراه فاصله متغیر سینهکار حفاری میان دریفتهای فوقانی و تحتانی

در شکل ۱۸ منحنیهای عرضی نشست سطح زمین برای فواصل مختلف سینه کارهای حفاری بخش فوقانی با بخش تحتانی تونل نشان داده شده است. مقادیر نشست سطحی بدست آمده از ۵ مرحل فوق بهترتیب برابر ۴۶/۳۵، ۴۷/۲۰، ۲۹/۸۰، ۲۹/۶۶ و ۲۵/۶۶ میلیمتر است. همانطور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، با افزایش فاصله میان سینه کارهای مختلف، نشست سطح زمین به علت تداخل کمتر زونهای توزیع تنش حاصل از سینه کارهای حفاری، کمتر شده است.

منحنیهای طولی نشست سطح زمین برای فواصل مختلف سینه کارهای حفاری میان بخش فوقانی با بخش تحتانی تونل در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، فواصل سینه کارهای حفاری کمتر از ۱۰ متر (تقریبا معادل یک برابر قطر تونل)، به صورت زونهای تیره رنگ معرف نشستهای سطحی غیرمجاز (بیش از ۳۰ میلیمتر) و زونهای روشن معرف نشست سطحی مجاز (کمتر از ۳۰ میلیمتر) با توجه به فرآیند تونلسازی در محیطهای شهری می باشند. این نتیجه تطابق خوبی با

اظهارت یو [۳۰] در مورد کنترل تغییرشکل و نشست سطح زمین ناشی از عملیات حفاری سینهکار تونل دارد. ایشان اظهار داشتند که بهترین عملکرد فرآیند تونلسازی زمانیست که فاصله سینهکارهای حفاری از یکدیگر بیش از یک برابر قطر تونل باشد.



شکل ۱۸- منحنیهای عرضی نشست سطحی زمین برای فواصل مختلف سینهکارهای حفاری دریفت فوقانی با دریفت تحتانی



شکل ۱۹– پروفیل های طولی نشست سطحی زمین برای فواصل مختلف سینه کارهای حفاری دریفت فوقانی بادریفت تحتانی

بر پایه نتایج بدست آمده، می توان این فواصل معین را به عنوان فواصل بهینه در زمان حفاری میان دریفتهای بخش فوقانی (دریف ۱ و ۲) و همچنین میان دریفتهای بخش تحتانی (۳، ۴ و ۵) به

منظور كنترل نشست سطح زمين لحاظ نمود.

۴- نتیجه گیری

بر اساس مطالعات انجام شده در این تحقیق، مهمترین نتایج حاصل به شرح ذیل است:

۱- بر پایه نتایج مقادیر نشست بدست آمده از مدلسازی عددی و مقایسه با مقادیر نشست مجاز، روش حفاری برش حلقهای و نیز دیافراگم میانی بهترتیب نقش موثری در کنترل و کاهش نشست سطحی زمین دارد که نتیجه آن کاهش آسیب به سازههای سطحی و زیرسطحی می اشد.

۲- بر پایه پروفیلهای طولی نشست حاصل از سه روش حفاری مرحلهای (برش حلقهای، دیافراگم میانی و طاق و پاطاق)، نشست سطح زمین در فاصله حدود ۱/۵ الی ۲ برابر قطر تونل در جلو سینه کار شروع شده و تا ۲/۵ الی ۳ برابر قطر تونل در پشت سینه کار به مقدار حداکثر مقدار خود رسیده است که در توافق خوبی با اظهارات مقداری و همکاران [۲۷] قرار دارد. همچنین مطابق اظهارات پانه دساری و همکاران [۲۷] قرار دارد. همچنین مطابق اظهارات پانه آمه است. سطح زمین در محل سینه کار برای هر سه آمده است.

۳- انتخاب توالی یا سکانس حفاری سینه کار تونل نقش موثری در کنترل نشست سطح زمین دارد. در انتخاب سکانس حفاری بهینه، فاکتورهای مختلفی از جمله زمان بسته شدن حلقه نگهداری تونل، تعداد مراحل حفاری (ویا حجم حفاری)، تقسیم بندی سینه کار حفاری و مرحله حفاری هسته نگهدارنده اثر گذار هستند.

منبعها

[6] Chakeri, H., Ozcelik, Y., & Unver, B. (2015). Investigation of ground surface settlement in twin tunnels driven with EPBM in urban area. Arabian Journal of geosciences, 8(9), 7655-7666.

[7] Ding, Z., Wei, X. J., & Wei, G. (2017). Prediction methods on tunnel-excavation induced surface settlement around adjacent building. Geomechanics and Engineering, 12(2), 185-195.

[8] Gan, X., Yu, J., Gong, X., Liu, N., & Zheng, D. (2022). Behaviours of existing shield tunnels due to tunnelling underneath considering asymmetric ground settlements. Underground Space.

[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.

[10] 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.

۴- افزایش تعداد سکانس حفاری (ویا کاهش حجم سینه کار هر مرحله از حفاری) و حفاری هسته نگهدارنده در مراحل پایانی سینه-کار، می تواند نقش موثری در محدود کردن نشست زمین ایفاء نماید.
 ۵- علاوه بر انتخاب روش حفاری و سکانس حفاری بهینه، انتخاب فاصله بهینه سینه کارهای مختلف حفاری نقش موثری در کاهش و کنترل نشست سطح زمین دارند. با افزایش فاصله سینه کارها از یکدیگر بهش ایکدیگر بهش می یابد. زمانیکه فاصله سینه کارها از یکدیگر بیش از رمین کاهش می از مین کاهش می وزیع تنش، نشست سطح زمین کاهش می باشد، حداکثر نشست سطح زمین در محدوده نشست مجاز زمین کاهش می یابد. زمانیکه فاصله سینه کارها از یکدیگر بیش از رمین کاهش می باشد، حداکثر نشست سطح زمین در محدوده نشست مجاز زمین کاهش می یابد. زمانیکه فاصله سینه کارها از یکدیگر بیش از رمین کاهش می باشد، حداکثر نشست سطح زمین در محدوده نشست مجاز قرار می گیرد.

۶- نتایج نشان داد که بهمنظور کنترل نشست سطح زمین برای تونل خط ۶ متروی تهران با روش حفاری برش حلقهای، فاصله حفاری سینه کارهای مختلف بایستی کمتر از ۱۰ متر (تقریباً معادل یک برابر قطر تونل) لحاظ نشود که این نتیجه تطابق بسیار خوبی با اظهارات یو [۳۰] دارد.

۵- سپاس گزاری

نویسنده گان این مقاله بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت راهآهن شهری تهران و حومه به جهت همکاری و مساعدت-های لازم در انجام تحقیق حاضر، اعلام مینماید.

[1] Ter-Martirosyan, A. Z., Cherkesov, R. H., Isaev, I. O., & Shishkina, V. V. (2022). Surface Settlement during Tunneling: Field Observation Analysis. Applied Sciences, 12(19), 9963.

[2] Fang, Q., Tai, Q., Zhang, D., & Wong, L. N. Y. (2016). Ground surface settlements due to construction of closely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements. Tunnelling and Underground Space Technology, 51, 144-151.

[3] Sharifzadeh, M., Kolivand, F., Ghorbani, M., & Yasrobi, S. (2013). Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground–Niayesh tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 35, 178-188.

[4] Amiri, S., & Dehghan, A. N. (2022). Comparison of shallow tunneling method with pile and rib method for construction of subway station in soft ground. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 16(6), 704-717.

[5] Hoek, E., 2001. Big tunnel in bad rock. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 127 (9), 726–740.

[11] 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.

[12] Strokova, L. A. (2015). Modeling of tunnelinginduced ground surface movement. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 24, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.

[13] 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

[14] 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.

[15] Ahn, C. Y., Park, D., & Moon, S. W. (2022). Analysis of surface settlement troughs induced by twin shield tunnels in sedimentary soils. Geomechanics and Engineering, 30(4).

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] Nematollahi, M., & Dias, D. (2019). Threedimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction–Case of the Shiraz subway line. Tunnelling and Underground Space Technology, 86, 75-88.

[20] Dehghan, A. N. (2020). Influence of Forepoling Umbrella on the Settlements Induced by Shallow Urban Tunneling. Geotechnical and Geological Engineering, 38, 5005–5022.

[21] Li, S., Zhang, Y., Cao, M., & Wang, Z. (2022). Study on excavation sequence of pilot tunnels for a rectangular tunnel using numerical simulation and field monitoring method. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1-17. [22] Tehran Urban and Suburban Railways Company (TUSRC) (2016). Report of Engineering Geology and Geotechnical; Tehran subway line 6- northern part (In Persian).

[23] Tehran Urban and Suburban Railways Company (TUSRC) (2016). Report of Design and Construction Method for the Tehran subway line 6- northern part (In Persian).

[24] Tehran Urban and Suburban Railways Company (TUSRC) (2016). Report of Tunnel Instrumentation and Monitoring for the Tehran subway line 6- northern part (In Persian).

[25] 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. Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE), 1(1), 57-67 (In Persian).

[26] Yu, C.W., Chern, J.C., 2007. Expert system for D&B tunnel construction. In: Underground Space The 4th Dimension of Metropolises, London, England.

[27] Desari, G.R., Rawlings, C.G., Bolton, M.D., 1996. Numerical modeling of a NATM tunnel construction in London clay. In: Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, pp. 491–496.

[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).

[29] Attewell, P.B., Woodman, J.P., 1982. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivitives caused by tunnelling in soil. Ground Eng. 15 (7), 13–22, 36.

[30] Yoo, C., 2009. Performance of multi-faced tunnelling – a 3D numerical investigation. Tunnel. Undergr. Space Technol. 24, 562–573.