

## کنترل نشست زمین در تونل سازی مکانیزه در محیط های شهری با انجام اقدامات اصلاحی مؤثر در تونل خط ۷ متروی تهران

حسن بخشنده امنیه\*<sup>۱</sup>، محمد صابر زمزم<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، hbakhshandeh@ut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری تخصصی استخراج، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، mohammad\_saber\_zamzam@yahoo.com

(دریافت ۱۲ آذر ۱۳۹۲، پذیرش ۲۴ خرداد ۱۳۹۴)

### چکیده

ساخت فضاهای زیرزمینی باعث اغتشاش در میدان تنش زمین و تغییر شکل آن می شود. احداث فضاهای زیرزمینی شهری مانند تونل های مترو، به علت نشست حساسیت ویژه ای دارند. در این تحقیق، روند حفاری تونل خط ۷ متروی تهران بررسی شده است. تئوری مربوط به پیش بینی نشست سطح زمین برای دو مقطع در کیلومترهای ۵+۱۰۰ و ۹+۹۰۰ تخمین زده شده است. همچنین با نرم افزار Plaxis 3D تحلیل عددی نشست این دو مقطع صورت گرفته و با نشست های ثبت شده بر محور تونل مقایسه شده اند. با اندازه گیری نشست زمین بر روی ساختمان های اطراف تونل نشان داده شد که نشست نامتقارنی در اطراف محور تونل اتفاق افتاده است. مقدار پیش بینی نشست به روش تحلیلی و عددی در این دو مقطع در محدوده مجاز قرار نگرفتند. بنابراین برای کنترل نشست، باید اقدامات اصلاحی صورت گیرد که در کیلومترهای ۵+۱۰۰، ضریب ۱/۶ برای فشار اتاق چمبر اعمال شد و برای کیلومترهای ۹+۹۰۰، محدوده مسیری احتیاج به به سازی منطقه ای دارد تا جبهه کار پایدار مانده و نشست ها در محدوده مجاز قرار گیرند. مقادیر رفتارنگاری نتایج این تحقیق را تأیید می کنند.

### کلمات کلیدی

کنترل نشست، فشار جبهه کار، تونل سازی مکانیزه، رفتارنگاری، به سازی

## ۱- مقدمه

زمین را به فاکتور بار (نسبت بین فاکتور باراضافی بر باراضافی در زمان ریزش) ارتباط دادند و بیان کردند برای فاکتور بار بیش از ۰/۵، نشست زمین به شدت افزایش می‌یابد [۷]. همچنین اچ ایی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۲) برای بررسی نشست در زمین‌های ماسه‌ای قلوهای علاوه بر مطالعه‌ی میدانی، مدلی فیزیکی ساخته و روند حفر TBM سپری را مدل‌سازی کرده و نشست متناظر با آن را اندازه‌گیری کردند. طبق نتایج پروفیل نشست در زمین‌های ماسه‌ای قلوهای به صورت V شکل با مرکز عمیق است [۸].

در این تحقیق، نشست زمین در اثر تونل‌سازی خط ۷ متروی تهران به روش تحلیلی و عددی بررسی شده است. حفر این تونل به دلیل عبور از مناطق شهری و ساختمان‌های حساس اهمیت ویژه‌ای دارد. بدین منظور رفتارنگاری نشست زمین و تأثیر آن بر سطح و ساختمان‌های اطراف بررسی و با میزان نشست مجاز مقایسه شده است. برای کنترل نشست و در محدوده‌ی مجاز قرار دادن میزان نشست در مقاطع مورد بررسی اقدامات اصلاحی مؤثر پیشنهاد شده است.

## ۲- مسیر خط ۷ متروی تهران

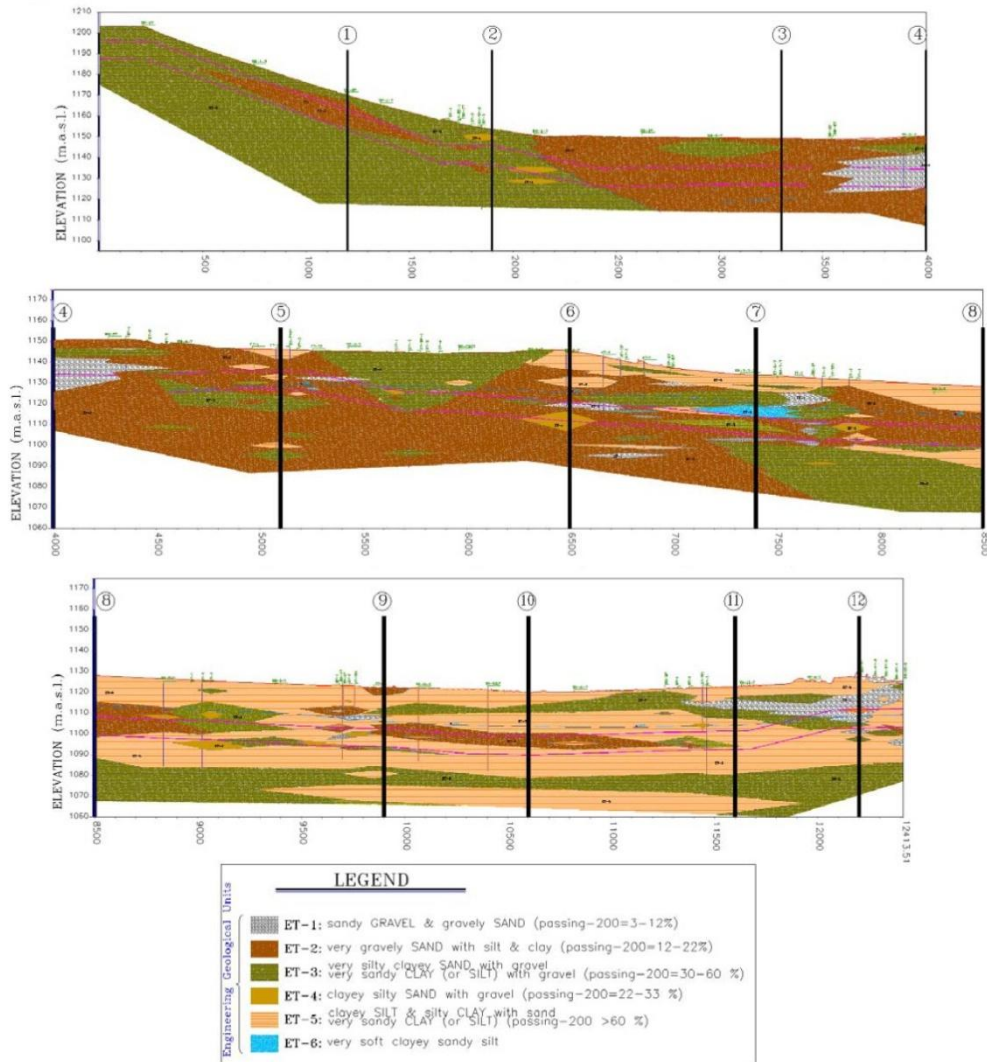
بر اساس مطالعات صورت گرفته، برنامه‌ی نهایی قطار شهری تهران شامل ۹ خط است. خط هفت متروی تهران از شرق تهران شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسج و امتداد یافتن در طول بزرگراه شهید محلاتی و اتصال به میدان قیام و گسترش آن در امتداد خیابان مولوی و هلال احمر و اتصال به بزرگراه نواب صفوی، مسیر آن در امتداد شمالی- جنوبی در طول بزرگراه نواب تغییر می‌یابد. این خط شامل ۲۸ ایستگاه است که تمامی آن‌ها زیرزمینی می‌باشند.

تونل خط هفت متروی تهران با طول ۲۲/۴ کیلومتر یکی از تونل‌های بزرگ مقطع و طولانی کشور است. به علت سطح مقطع بزرگ تونل، عبور از زیر مناطق مسکونی، نوع زمین و در نهایت داشتن ضریب ایمنی بالا و سرعت مناسب، عملیات حفاری این تونل با استفاده از دستگاه سپر تعادلی زمین (EPB) انجام خواهد شد. این تونل از دو قسمت، یکی در جهت شرقی- غربی و دیگری در جهت جنوبی- شمالی تقسیم شده است. بر این اساس حفاری دو قطعه‌ی تونل از

نشست زمین از جمله مخاطراتی است که همواره همراه با تونل‌سازی همراه بوده و باعث آسیب به سازه‌های اطراف تونل می‌شود. چون در مناطق شهری اغلب نشست به صورت نامتقارن رخ می‌دهد، خمش و پیچش در ساختمان‌ها افزایش یافته و آسیب‌های وارده بیشتر می‌شود. بدین منظور تونل‌سازی سپری یکی از روش‌های اصلی و ایمن در تونل‌سازی شهری است. به علت اهمیت نشست زمین و تأثیر مستقیم آن بر هزینه‌های پروژه، مطالعات مختلفی برای پیش‌بینی و کنترل آن صورت گرفته و در ۴۰ سال گذشته روابط متعددی برای پیش‌بینی نشست زمین ارائه شده است. لیتوینزین<sup>۱</sup> (۱۹۵۶) بر اساس تئوری تصادفی، تأثیر حفر تونل بر روی سطح زمین را معادل با تأثیر میکروالمان‌های بیشمار حفاری دانست [۱]. پس از آن پک<sup>۲</sup> (۱۹۶۹) رابطه‌ای برای تخمین نشست زمین بر اساس توزیع گوسی ارائه کرد [۲]. کردینگ و هانیسمیر<sup>۳</sup> (۱۹۷۵) بر پایه‌ی مفاهیم هندسی به روشی برای پیش‌بینی نشست زمین دست یافتند. در این مدل فرض کردند حجم از دست رفته‌ی اطراف تونل معادل حجم نشست در سطح زمین است [۳]. آرلی و نیو<sup>۴</sup> (۱۹۸۲) پیشنهاد کردند که نشست زمین حاصل از تونل‌کاری را می‌توان با روابط تجربی، منحنی تابع خطای ارائه شده توسط پک (۱۹۶۹) بیان کرد. آن‌ها نشست زمین را به صورت جریان شعاعی ذرات خاک در جهت محور تونل و در شرایط کرنش صفحه‌ای ثابت فرض کردند [۴]. آتلول و وودمن<sup>۵</sup> (۱۹۸۲) با بررسی تعدادی تونل‌های در حال ساخت در رس نشان دادند که نشست طولی را می‌توان با منحنی‌های توزیع بیان کرد [۵]. پس از آن آویاگی و اینستین<sup>۶</sup> (۱۹۹۵) کمک‌های تصمیماتی برای تونل‌سازی (DAT)<sup>۷</sup> در سنگ‌های سخت را برای زمین‌های سست گسترش دادند و برنامه‌ای برای پیش‌بینی نشست در دو جهت طولی و عرضی ارائه کردند [۶]. علاوه بر روابط پیشنهادی پیش‌بینی نشست زمین، محققین متعددی نیز با ساخت مدل‌های آزمایشگاهی، نشست زمین حاصل از تونل‌سازی را مدل‌سازی کرده‌اند. به عنوان مثال وو و لی<sup>۸</sup> (۲۰۰۳) مکانیزم نشست و ریزش در اثر تونل‌سازی تونل‌های منفرد و موازی در خاک‌های رسی را با استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژ بررسی و مطالعه کردند. آن‌ها نشست

مسیر تونل در این قسمت به شش واحد تقسیم شده که شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل و جدول ۱ بیان‌کننده‌ی توصیف و رده‌بندی واحدهای خاکی است.

محل ایستگاه N7 در تقاطع خیابان قزوین و بزرگراه نواب توسط دو دستگاه EPB-TBM شروع شده و به سمت شمال تا ایستگاه U7 و به سمت شرق تا ایستگاه G7 ادامه می‌یابد. در این تحقیق دو مقطع (کیلومتر از ۵۱۰۰ و ۹۹۰۰) از بخش حفر شده‌ی تونل شرقی- غربی متروی خط ۷ بررسی شده است. از نظر زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، لایه‌های خاکی



شکل ۱: پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران [۹]

جدول ۱: ویژگی‌های ژئومکانیکی واحدهای خاکی در مسیر خط ۷ متروی تهران [۹]

ET-6	ET-5	ET-4	ET-3	ET-2	ET-1	واحد زمین شناسی
سیلت ماسه‌ای	سیلت رسی و رس سیلتی به همراه اندکی ماسه	خاک درشت‌دانه از جنس ماسه‌ی رسی به همراه گراول	ماسه‌ی رسی به همراه گراول	خاک درشت‌دانه از جنس ماسه‌ی گراولی به همراه سیلت و رس	گراول ماسه‌ای و ماسه‌ی گراولی	توصیف خاک
ML	CL, MI & CL-ML (rarely CH)	SC, SM	SC, SM & CL	SC, SC- SM & GC	GW, GW-GM, GP-GC, SW & SP	نوع خاک
۰	۰/۳۱	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۱۴	چسبندگی ( $Kg / cm^2$ )
۲۷	۲۸	۳۲	۳۳	۳۳	۳۴	زاویه اصطکاک داخلی (Degree)
۱۰۰	۳۵۰	۵۰۰	۵۰۰	۷۵۰	۸۰۰	مدول الاستیک ( $Kg / cm^2$ )
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳	۰/۳۲	۰/۳	۰/۳	نسبت پواسون ( $\nu$ )
۱/۷۰	۱/۷۰	۱/۸۲	۱/۹۰	۱/۸۴	۱/۸۶	چگالی خشک ( $g / cm^3$ )

منطقه‌ی گرین‌فیلد پیش از در نظر گرفتن مجموعه‌ای از ساختمان‌های موجود مهم است.

با توجه به وضعیت تأسیسات سطحی، زمین‌شناسی، آب زیرزمینی و روبراه، تعداد ۱۲ مقطع به عنوان مقاطع شاخص تونل انتخاب شده و موقعیت آن‌ها در جدول ۲ بیان شده است. در این تحقیق با توجه به روند ثبت اطلاعات، تنها دو مقطع در کیلومترهای ۵+۱۰۰ و ۹+۹۰۰ به روش تحلیلی و عددی بررسی شده‌اند.

### ۳- تخمین نشست خط ۷ مترو تهران به روش تحلیلی

با وجود آنکه حضور ساختمان‌ها در سطح زمین باعث اصلاح توسعه‌ی نشست زمین با توجه به نزدیکی سازه‌ها به تونل می‌شوند، درک گسترش نشست حاصل از تونل‌کاری بر روی

جدول ۲: مقاطع شاخص خط ۷ مترو تهران [۹]

شماره مقطع	کیلومتر اژ	واحد خاکی سینه کار	روباره تونل (متر)
۱	۱۲۰۰	ET2	۷/۵
۲	۱۹۰۰	ET3	۸
۳	۳۳۰۰	ET2	۱۳/۵
۴	۴۰۰۰	ET1	۱۶
۵	۵۱۰۰	ET2 - ET5	۱۰
۶	۶۵۰۰	ET1 - ET4	۲۴/۵
۷	۷۴۰۰	ET2 - ET3	۲۰
۸	۸۵۰۰	ET2	۲۰
۹	۹۹۰۰	ET2 - ET5	۱۹/۵
۱۰	۱۰۶۰۰	ET2 - ET5	۲۱
۱۱	۱۱۶۰۰	ET5	۲۱/۵
۱۲	۱۲۱۰۰	ET1 - ET3	۱۵/۵

که در آن  $\alpha = (x - x_i)/i$ ،  $G(0) = 0.5$  در زمانی که  $x = x_f$  نقطه‌ی بالای جبهه‌کار) و  $G(1) = 1$  زمانی که  $(x - x_i) \rightarrow \infty$  است.

چون بخشی از هدف این تحقیق پیش‌بینی بیشینه نشست پس از تونل‌سازی است، با فرض  $(x - x_i)/i > 3$  و  $G[(x - x_i)/i] = 1$  مقادیر  $(x - x_f)/i < -3$  و  $G[(x - x_f)/i] = 1$  به دست آمده و رابطه‌ی ۱ به صورت رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید که مطابق منحنی نشست گوسی ارائه شده توسط پک است [۱۰].

به منظور در نظر گرفتن حد بالا و پایین برای هر یک از لایه‌ها، مقدار کمینه و بیشینه  $k$  و  $V_s$  و نتایج کمترین و بیشترین میزان عرض نشست ( $i$ ) و نشست زمین با استفاده از روابط مرتبط در جدول ۳ ارائه شده است.

در این تحقیق، نشست در کیلومتر اژهای ۵+۱۰۰ و ۹+۹۰۰ بررسی می‌شود که مطابق جدول ۲ شامل ۲ مقطع اصلی ۵ و ۹ است. در ابتدا هدف پیش‌بینی بیشینه نشست در این مقاطع با استفاده از روابط بیان شده است. بدین منظور متغیرهای  $i$  (با استفاده از متغیر  $k$ ) و  $V_s$  به ترتیب بر اساس جنس خاک و دستگاه حفاری تعیین شده و با استفاده از رابطه‌ی ۳ بیشینه نشست محاسبه می‌شود.

$$S = S_{\max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) = \frac{V_L}{i\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \quad (3)$$

شکل‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده‌ی پروفیل کمینه و بیشینه نشست تخمین زده شده‌ی ۲ مقطع انتخابی می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نشست‌های رخ داده در دو طرف محور تونل به‌طور تقریبی متقارن بوده اما این تقارن می‌تواند در مکان‌های نزدیک به ساختمان‌های چند طبقه که باعث القای بار و نشست بیشتری می‌شوند وجود نداشته باشد.

یکی از پرکاربردترین روابط تخمین نشست زمین، رابطه‌ی ارائه شده توسط آتلول و وودمن بوده که به صورت رابطه‌ی ۱ ارائه شده است.

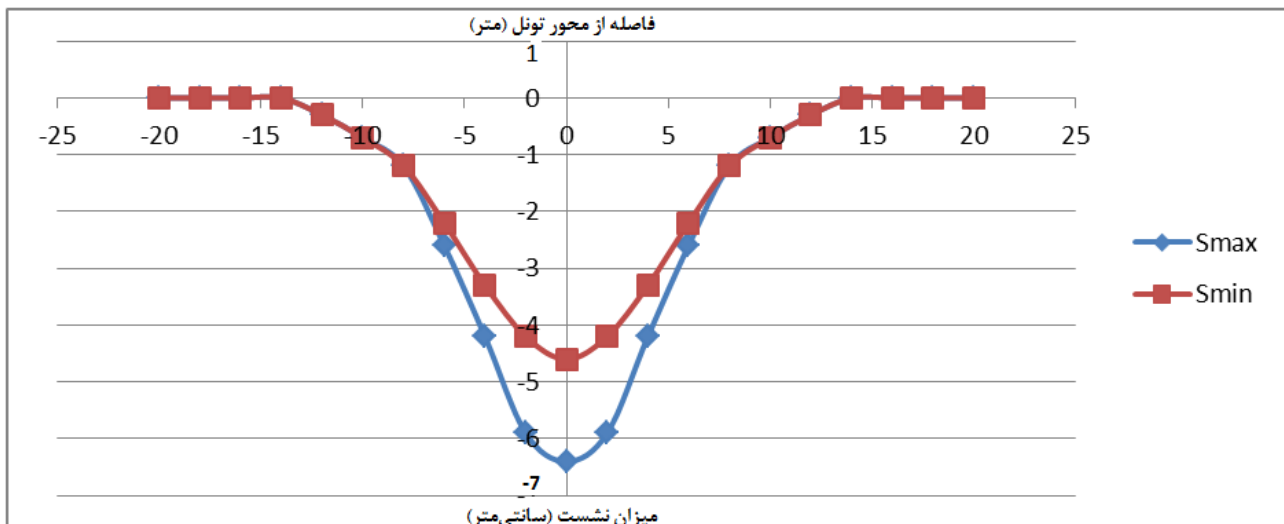
$$S = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i} \cdot e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \cdot \left\{ G\left[\frac{x-x_i}{i}\right] - G\left[\frac{x-x_f}{i}\right] \right\} \quad (1)$$

که در آن،  $S$  نشست در فاصله‌ی  $y$  از محور تونل و فاصله‌ی طولی  $x$ ،  $V_s$  حجم نشست در واحد متر تونل ( $m^3/m$ )،  $x_i$  نقطه‌ی شروع تونل ( $m$ )،  $x_f$  موقعیت جبهه‌کار تونل ( $m$ )،  $i$  پارامتر عرض نشست (به صورت  $i = k \cdot z_0$  که  $k$  پارامتر بدون بعد بر اساس نوع خاک و  $z_0$  عمق محور تونل از سطح زمین است) و  $G$  تابعی به صورت رابطه‌ی ۲ است.

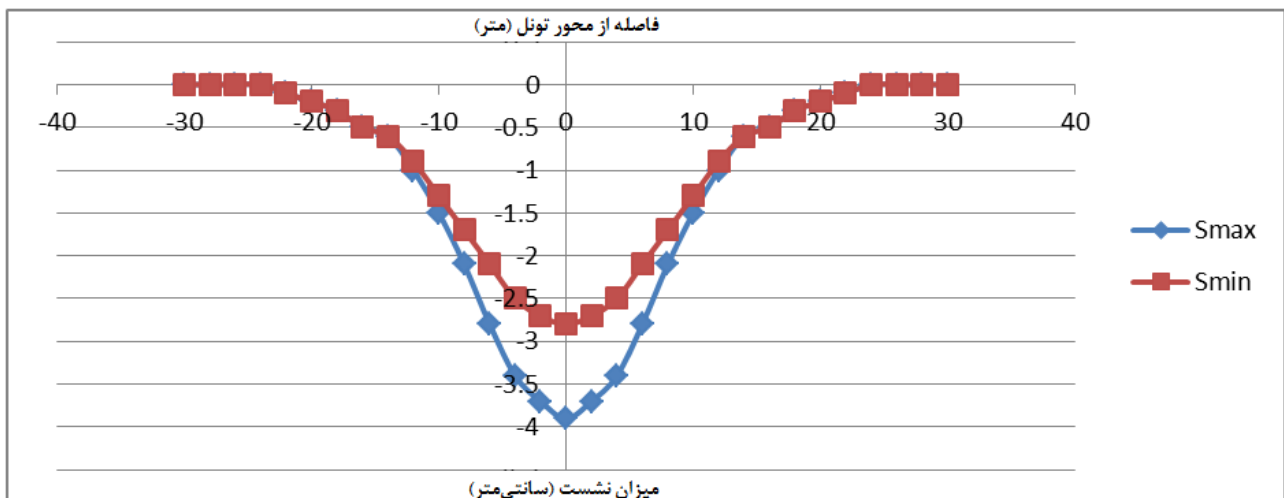
$$G(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{\alpha^2}{2}} d\alpha \quad (2)$$

جدول ۳: میزان نشست ماکزیمم برای دو مقطع تونل خط ۷ مترو تهران

حداکثر نشست (mm)		حجم نشست ( $V_L$ )		پارامتر بدون بعد (K)		پارامتر عرض نشست (i)		عمق محور تونل ( $Z_0$ )	نوع خاک	شماره مقطع
$S_{max}$	$S_{min}$	max	min	$K_{max}$	$k_{min}$	$i_{max}$	$i_{min}$			
۶۴	۴۶	۱	۰/۸	۰/۴۷۴	۰/۴۲۴	۶/۹۲	۶/۱۹	۱۴/۶	ET2- ET5	۵
۳۹	۲۸	۱	۰/۸	۰/۴۷۸	۰/۴۲۸	۱۱/۵۷	۱۰/۳۶	۲۴/۲	ET2-ET5	۹



شکل ۲: منحنی کمیته و بیشینه نشست در مقطع ۵ (کیلومتر از ۱۰۰+۵)

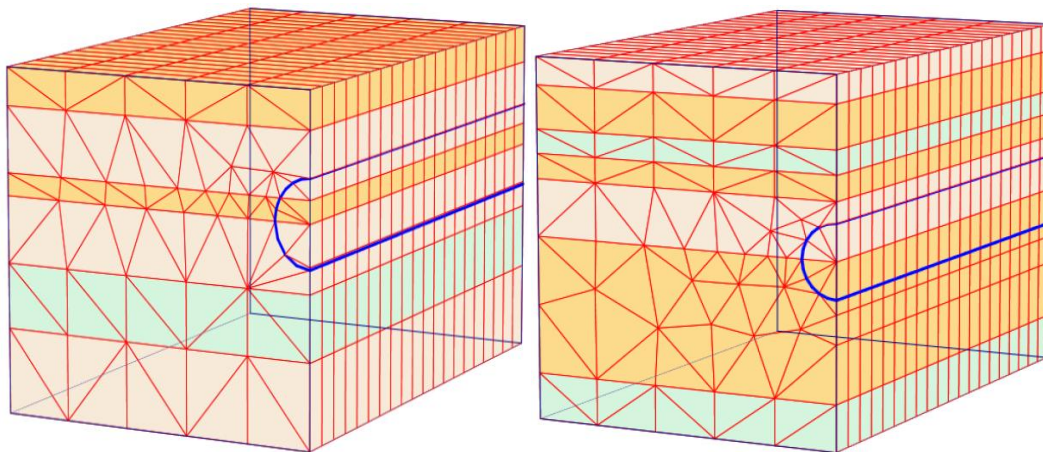


شکل ۳: منحنی کمیته و بیشینه نشست در مقطع ۹ (کیلومتر از ۹۰۰+۹)

## ۴- تخمین عددی نشست خط ۷ مترو تهران

در این بخش، نشست سطحی در امتداد مسیر تونل در مقاطع مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار سه بعدی اجزای محدود Plaxis 3D Tunnel انجام شده است. ساخت مدل‌ها با المان‌های حجمی ۱۵ گرهی برای مش‌بندی صورت گرفته است. شکل ۴ مش‌بندی سه‌بعدی مقاطع را نشان می‌دهد. نکته‌ی مهم، طول ۱/۵ متری قطعات سگمنت است اما برای آن‌که بتوان آنالیزها را در زمان کمتری انجام داد، ضخامت قطعات پیشروی، ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. بخش ابتدایی (شیلد دستگاه) که حفاری را انجام می‌دهد ۱۰/۵ متر بوده که در سه قطعه‌ی ۳/۵ متری مدل شده است. پارامترهای شیلد، برای لاینینگ در نظر گرفته شده است. فشار جبهه‌کار و فشار تزریق در تاج تونل (فشار جبهه‌کار + ۵۰ کیلوپاسکال) مطابق با جدول ۴ در نظر گرفته شده است.

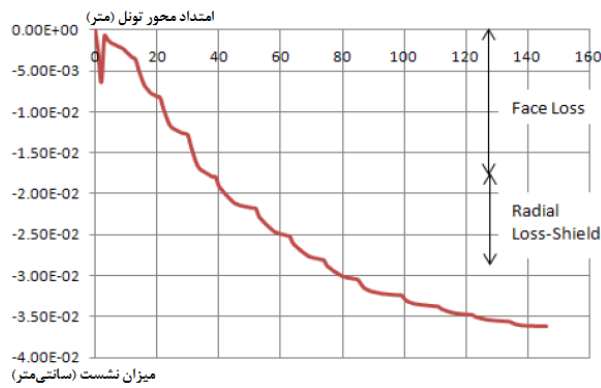
افزایش فشار جبهه‌کار به‌صورت مثلی با مقدار افزایشی معادل ۱۲ کیلونیوتن بر مترمکعب در هر متر ارتفاع به‌صورت بار عمود بر سینه‌ی حفاری مدل شده است. در بخش انتهایی که سگمنت نصب می‌شود و عملیات پایان می‌یابد، پارامترهای سگمنت برای لاینینگ در نظر گرفته شده است. در جدول ۵، خصوصیات ماشین حفاری و پوشش بتنی تونل خط ۷ متروی تهران ارائه شده است. برای اجتناب از تأثیر شرایط مرزی غیرواقعی مدل‌سازی حفاری و نصب سگمنت تا عمق ۵۰ متری ادامه یافته و تغییرمکان گام‌های انتهایی به‌عنوان تغییرمکان نهایی معیار عمل قرار گرفته است. در شکل ۵ نمودارهای نشست قائم در امتداد محور تونل برای مقاطع انتخابی نشان داده شده است. در جدول ۶ نتایج تحلیل عددی برای نشست مقاطع مورد نظر ارائه شده است.



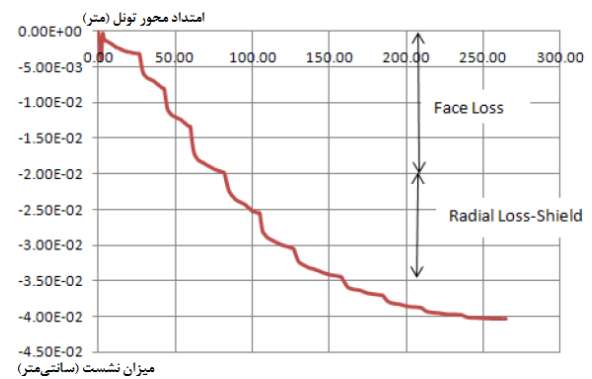
مقطع ۹ (کیلومتر ۹+۹۰۰)

مقطع ۵ (کیلومتر ۵+۱۰۰)

شکل ۴: مش‌بندی سه‌بعدی مقاطع خط ۷ متروی تهران



مقطع ۹ (کیلومتر ۹+۹۰۰)



مقطع ۵ (کیلومتر ۵+۱۰۰)

شکل ۵: نمودارهای نشست قائم در امتداد محور تونل برای مقاطع انتخابی

جدول ۴: مقاطع شاخص خط ۷ متروی تهران برای محاسبه‌ی نشست

شماره مقطع	کیلومتر	روباره‌ی تونل (متر)	فشار جبهه کار (کیلوپاسکال)	فشار تزریق (کیلوپاسکال)
۵	۵۱۰۰	۱۰	۲۵	۷۵
۹	۹۹۰۰	۱۹/۵	۷۵	۱۲۵

جدول ۵: خصوصیات ماشین حفاری و پوشش بتنی تونل خط ۷ متروی تهران

پارامتر	واحد	مقدار	
نوع مواد	-	پوشش بتنی	EPB
صلبیت محوری (EA)	MN / m	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
صلبیت خمشی (EI)	MNm <sup>2</sup> / m	۱۰۲	۵۰
ضخامت (d)	m	۰/۳۵۰	۰/۲۴۵
وزن (w)	w	۸/۴	۴۸/۸
نسبت پواسون (U)	-	۰/۲	۰/۲

جدول ۶: نتایج حاصل از نشست برای مقاطع انتخابی به روش عددی

شماره مقطع	نشست کل (میلی‌متر)	نشست ناشی از پیش آمدگی سینه حفاری (میلی‌متر)	نشست شعاعی اطراف شیلد (میلی‌متر)	نشست ناشی از تزریق گروت (میلی‌متر)	نشست ناشی از تغییر شکل‌های پوشش سگمندی (میلی‌متر)
۵	۴۳/۷۵	۲۰/۰۸	۲۰/۶۶	۲/۰	۱/۰۱
۹	۴۱/۷۴	۲۱/۳۹	۱۲/۰۹	۲/۵۸	۵/۶۸

پیش آمدگی سینه‌ی حفاری و نشست شعاعی اطراف شیلد است. که در واقع بخش پیش آمدگی سینه‌ی حفاری حدود

همان‌طور که از نتایج آنالیز عددی جدول ۶ مشاهده می‌شود قسمت عمده‌ی نشست‌ها مربوط به دو بخش نشست ناشی از



سطحی جزئی، می‌تواند باعث تخریب قسمت برش دستگاه حفاری و تحمیل هزینه‌های زیاد به‌همراه اتلاف زمان برای تعمیر شود.

جدول ۸: مقادیر فشار تدقیق شده‌ی اتاقک حفاری (کیلومتر) از ۴+۸۰۰ تا ۵+۲۰۰

ردیف	متر از		فشار چمبر	
	شروع	پایان	کمینه	بیشینه
۱	۴۸۰۰	۴۹۰۰	0.4 bar	0.6 bar
۲	۴۹۰۰	۵۰۰۰	0.5 bar	0.7 bar
۳	۵۰۰۰	۵۱۰۰	0.45 bar	0.6 bar
۴	۵۱۰۰	۵۲۰۰	0.6 bar	0.8 bar

برای مقطع ۹، حالت بیشینه ممکن دستگاه حفاری (فشار جبهه‌کار برابر ۱۸۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق برابر ۲۸۰ کیلوپاسکال) در نظر گرفته شد که نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که افزایش فشار جبهه‌کار و فشار تزریق تأثیر اندکی بر کاهش نشست‌ها خواهد داشت. بنابراین با اضافه کردن فشار جبهه‌کار و فشار تزریق پشت سگمنت‌ها هرچند امکان کاهش نشست‌های مقطع ۹ تا حد مجاز وجود نخواهد داشت اما به هر حال این امر موجب کاهش نشست و نزدیک شدن آن‌ها به حدود مجاز خواهد شد.

#### ۵- معیارهای بررسی نشست مجاز ناشی از تونل‌سازی

تونل‌سازی در مناطق شهری به علت ایجاد نشست و تاثیر بر ساختمان‌های اطراف از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین علت استانداردهای مختلفی جهت تعیین نشست مجاز بر اساس نوع ساختمان ارائه شده است. اغلب پارامترهای کنترلی که برای بررسی نشست مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل بیشینه نشست ( $S_{max}$ )، بیشینه جابه‌جایی ( $\Delta_{max}$ ) و بیشینه چرخش ( $\beta_{max}$ ) می‌باشند. در این راستا بر اساس آیین‌نامه‌ی اروپا (EUROCODE 7- 1997-1: 2004) باتوجه به آنکه میزان چرخش نسبی مجاز برای سازه‌های قاب باز، دیوار حایل، ساختمان‌های با مصالح بنایی متفاوت است و در بازه‌ی ۰/۰۵٪ تا ۰/۳۳۳٪ متغیر است، مقدار ۰/۲٪ به عنوان بیشینه مجاز برای اکثر سازه‌ها بوده و مقدار حدی چرخش نسبی برابر ۰/۶۶۷٪ است. همچنین برای سازه‌های

۳۵ تا ۵۰ درصد کل نشست و بخش نشست شعاعی اطراف شیلد حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد نشست کل را به خود اختصاص داده است و کمتر از ۲۰ درصد نشست کل را دو بخش نشست ناشی از تزریق گروت و نشست ناشی از تغییر شکل-های پوشش سگمنتی تشکیل می‌دهد. از چون مقطع ۵ (کیلومتر) ۱۰۰+۵) و مقطع ۹ (کیلومتر) ۹۰۰+۹) در منطقه‌ی مسکونی قرار دارند، این میزان نشست خارج از محدوده‌ی مجاز بوده و باید برای آن‌ها اقدامات اصلاحی مد نظر قرار گیرد.

از راه‌حل‌های اصلاحی که باید انجام شود تا میزان نشست در دو مقطع مورد نظر، داخل محدوده‌ی مجاز قرار گیرد و به پایین‌ترین میزان برسد، می‌توان به تغییر پارامترهای دستگاه (تغییر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق) و تغییر پارامترهای خاک (زهکشی و به‌سازی زمین) اشاره کرد. در مقطع ۵ (کیلومتر) ۱۰۰+۵)، برای فشار اتاق چمبر ضریب‌های متفاوتی از کمینه فشار جبهه‌کار محاسبه شده اعمال شد که با توجه به آن نشست‌هایی حاصل شد. نشست‌های ایجاد شده‌ی متناظر با هر ضریب در جدول ۷ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال ضریب ۱/۶ میزان نشست در این مقطع به محدوده‌ی مجاز می‌رسد و با اعمال ضریب ۱/۸ برای اتاق چمبر می‌توان به میزان نشست کمتری رسید. مقادیر تدقیق شده‌ی فشار محفظه‌ی حفاری (اتاق چمبر) برای این کیلومتر از جدول ۸ ارائه شده است. مقادیر تدقیق شده‌ی ارائه شده از طرف کارفرما اعمال فشار با ضریب ۱/۶ تا ۱/۸ را تأیید می‌کند.

جدول ۷: محاسبه‌ی نشست کل مقطع ۵ (کیلومتر) ۱۰۰+۵) با

احتساب ضرایب متفاوت برای اتاق چمبر

ضریب اتاق چمبر	نشست کل (میلی‌متر)
n = P	۴۳/۷۵
n = ۱/۲P	۴۲/۰۲
n = ۱/۴P	۳۸/۱۳
n = ۱/۶P	۳۱/۲۲
n = ۱/۸P	۲۴/۰۳

البته باید توجه داشت اگرچه فشارهای بالای نگهدارنده‌ی جبهه‌کار باعث کنترل نشست در سطح زمین می‌شود اما اعمال فشارهای خیلی زیاد علاوه بر ایجاد بالادگی‌های

استاندارد با پی‌های منفرد، بیشینه تغییر مکان مطلق ۵۰ میلی‌متر و بیشینه تغییر مکان نسبی ۲۰ میلی‌متر بین ستون‌های مجاور مجاز است [۱۱].

جدول ۹: نتایج افزایش فشار جبهه کار و فشار تزریق برای مقطع ۹ (کیلومتر از ۵۰۰+۹)

مقطع ۹	نشست کل (میلی‌متر)	نشست ناشی از پیش آمدگی سینه حفاری (میلی‌متر)	نشست شعاعی اطراف شیلد (میلی‌متر)	نشست ناشی از تزریق گروت (میلی‌متر)	نشست ناشی از تغییر شکل‌های پوشش سگمنتی (میلی‌متر)
فشار پایین	۴۱/۷۴	۲۱/۳۹	۱۲/۰۹	۲/۵۸	۵/۶۸
فشار بالا	۳۷/۲۱	۱۸/۶۵	۱۱/۱۱	۲/۳۲	۵/۲۲

بورلند<sup>۱۰</sup> و همکاران (۱۹۷۷) جدولی برای حد مجاز تنش کششی بر مبنای نسبت  $\Delta_{\max} / L$  ارائه کرده‌اند و بیشینه نشست مجاز در تراز پی را به عنوان پارامتر کنترلی دیگری در محدوده‌ی ۲۵ تا ۳۵ میلی‌متر دانستند [۱۲].

رانکلین (۱۹۸۸) آسیب‌های رخ داده در سازه‌ها را به علت ویژگی‌های طبیعی و ذاتی سازه و نشست‌های نامتقارن ناشی از عوامل بیرونی دانسته و حد مجاز  $\beta_{\max}$  و  $S_{\max}$  برای سازه‌ها را به ترتیب برابر ۱/۲۰۰ تا ۱/۵۰۰ و ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر تعیین کرده است [۱۲].

چون مهم‌ترین عامل ایجاد آسیب در سازه‌ها، نشست‌های نامتقارن بوده که در واقع متناسب با چرخش است و نیز با توجه به حساس بودن پروژه‌ی خط ۷، معیارهای کنترلی برای نشست و تغییر شکل‌ها به صورت زیر انتخاب شده‌اند.

- بیشینه نشست مطلق در مسیر ۳۵ میلی‌متر برای مناطق مسکونی و ۵۰ میلی‌متر برای سایر مناطق
- بیشینه چرخش نسبی ۰/۲٪ برای مناطق مسکونی و ۰/۵٪ برای سایر مناطق

#### ۶- رفتار نگرایی تونل خط ۷ متروی تهران

با توجه به شکل ۶ به جز دو منطقه‌ی مسکونی که اولی شامل بافت شهری حد فاصل تقاطع بزرگراه محلاتی و خیابان ۱۷ شهریور و میدان قیام (کیلومتر از ۴+۵۰۰ تا ۴+۴۰۰) و دومی بافت شهری حد فاصل تقاطع هلال احمر- نفت تا تقاطع نواب- قزوین (کیلومتر از ۸+۷۰۰ تا ۱۲+۲۰۰) است، سایر

بخش‌های مسیر بخش شرقی- غربی تونل خط ۷ متروی تهران از زیر بزرگراه و خیابان عبور می‌کند. با توجه به نتایج مقطع ۹ (کیلومتر از ۵۰۰+۹)، مسیر تونل در این کیلومتر از مسیر تونل و به‌ویژه مقطع ۹ رفتارنگاری و بررسی شده است.

به منظور بررسی نشست زمین در اثر تونل‌سازی، رفتارنگاری در سطح زمین و سازه‌های اطراف تونل انجام گرفت. برای اندازه‌گیری نشست خاک برجا، پین‌های ۱/۲۰ متری با فواصل ۵۰ متر از یکدیگر بر روی محور تونل نصب شدند. همچنین در هر ۱۰۰ متر، دو پین در سمت راست و چپ تونل نیز نصب شد. شکل ۷ نشان دهنده‌ی ساختار پین نصب شده است. همچنین در فواصل ۵۰ متری، گوی‌هایی به‌منظور اندازه‌گیری نشست ساختمان‌ها، بر روی ساختمان‌های اطراف محور تونل نصب شده‌اند. در مناطق حساس مانند چهارراه‌ها یا ساختمان‌های حساس دیگر نیز پین و گوی‌هایی اضافی نصب شده‌اند.

#### ۶-۱- نشست در محدوده‌های ترافیکی و مسکونی

در محیط‌های شهری علاوه بر ساختمان‌ها و خیابان‌ها، محدوده‌های ترافیکی مانند چهارراه‌ها نیز از نظر نشست اهمیت ویژه‌ای دارند. در این مناطق به‌دلیل ترافیک شهری، بار دینامیکی توسط ماشین‌ها ایجاد شده و در نتیجه باعث تشدید نشست در این قسمت‌ها می‌شود. بدین منظور بررسی نشست ایجاد شده در این قسمت‌ها کمک به درک بهتری از رفتار زمین و جلوگیری از حوادث احتمالی می‌کند. علاوه بر آن حضور سازه‌های زیرزمینی دیگر مانند تونل و چاه نیز در نزدیکی تونل در حال حفر باعث افزایش نشست زمین در اثر برهم نهی آن‌ها می‌شود.

شد. همچنین میزان نشست ثبت شده توسط این پین ها در جدول ۷ آورده شده است. علت نشست بالا در نقاط ۷، ۱۰ و ۱۴ حضور تونل رباط کریم، گالری های خط ۳ و چاه های آب رباط کریم در قسمت جنوبی است.

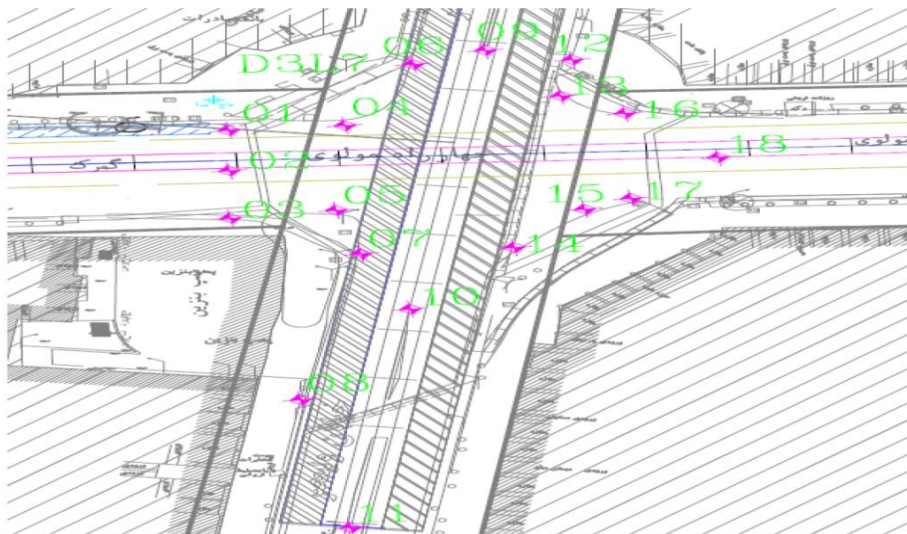
مقطع ۹ (کیلومتر ۹+۹۰۰) در محدوده ی چهارراه مولوی که محل تقاطع متروی خط ۳ و خط ۷ است از لحاظ رفتارنگاری نشست بررسی شده است. بدین منظور ۱۸ پین مطابق شکل ۸ و جدول ۱۰ در طرفین تونل و محدوده ی چهار راه نصب



شکل ۶: موقعیت مناطق مسکونی در مسیر تونل شرقی - غربی خط ۷ متروی تهران



شکل ۷: ساختار پین مورد استفاده برای رفتارنگاری زمین



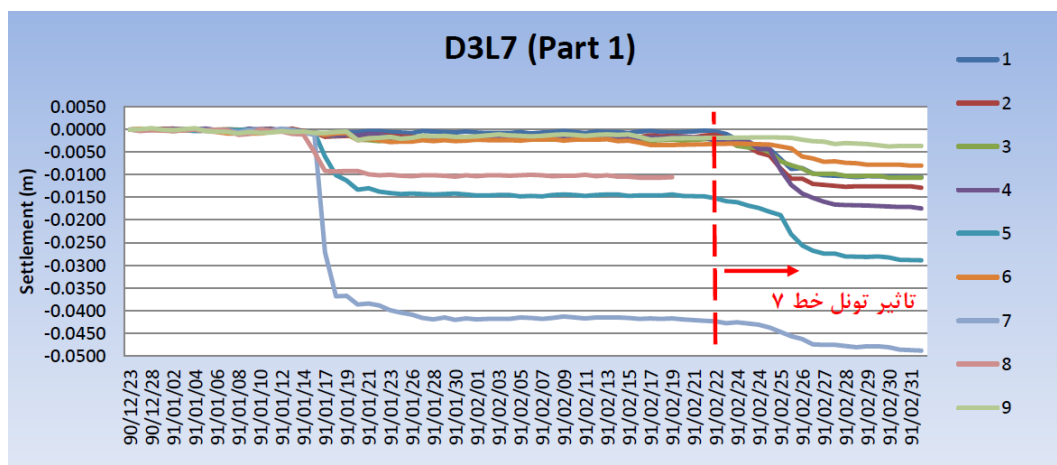
شکل ۸: موقعیت پین های نصب شده در چهارراه مولوی

جدول ۱۰: مشخصات و نگاشت پین‌های نصب شده در چهارراه مولوی

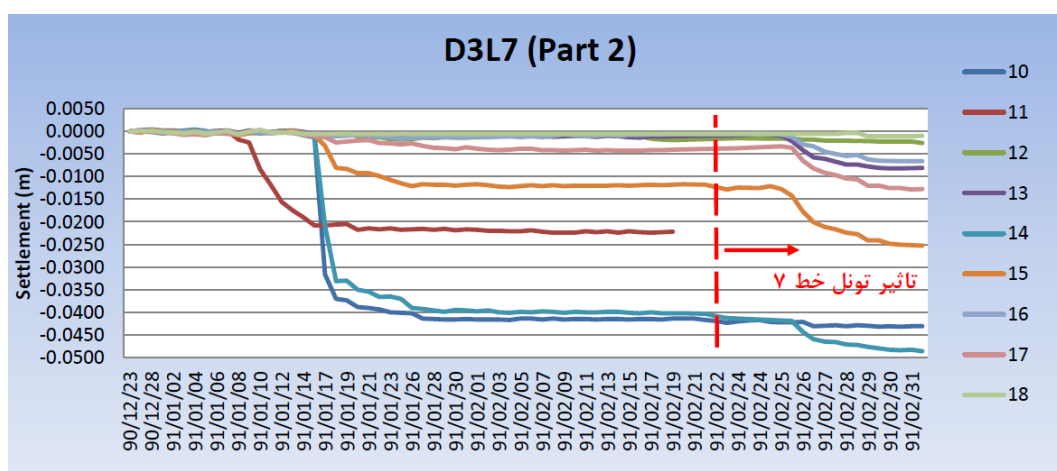
کد ابزار	فاصله از محور تونل خط ۷ (m)	موقعیت نسبت به محور تونل خط ۷	کیلومتر از نصب	نشست (mm)
L7-LP-01	۶/۲	L	۹۳۹۰	۱۰/۵
L7-LP-02	۲/۱	C	۹۳۹۰	۱۲/۸
L7-LP-03	۱۱/۹	R	۹۳۹۰	۱۰/۶
L7-LP-04	۶/۶	L	۹۳۸۰	۱۷/۴
L7-LP-05	۱۰/۸	R	۹۳۸۰	۲۸/۸
L7-LP-06	۱۸/۹	L	۹۴۷۶	۸
L7-LP-07	۱۹/۸	R	۹۴۷۶	۴۸/۸
L7-LP-08	۴۹/۶	R	۹۴۷۶	۱۰/۱
L7-LP-09	۲۱/۴	L	۹۳۷۰	۳/۶
L7-LP-10	۳۱/۵	R	۹۳۷۰	۴۳
L7-LP-11	۷۶/۲	R	۹۳۷۰	۲۱/۶
L7-LP-12	۱۹/۱	L	۹۴۹۰	۲/۵
L7-LP-13	۱۱/۷	L	۹۴۹۰	۸/۱
L7-LP-14	۱۹/۳	R	۹۴۹۰	۴۸/۶
L7-LP-15	۷/۷	R	۹۳۵۷	۲۵/۲
L7-LP-16	۱۱/۸	L	۹۳۵۲	۶/۶
L7-LP-17	۹/۷	R	۹۳۵۲	۱۲/۷
L7-LP-18	۱/۶	C	۹۳۴۳	۰/۹

شکل‌های ۹ و ۱۰ پیشرفت نشست زمین با نزدیک شدن جبهه‌کار تونل خط ۷ به نقاط مورد نظر را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن تونل خط ۷ نقاط قرار گرفته در قسمت جنوبی و در اطراف تونل خط ۳ نشست قابل توجهی از خود نشان داده و به ثبات می‌رسند. پس از عبور تونل همانند نقاط دیگر ابتدا با شیب زیاد افزایش می‌یابند تا به مقدار ثابتی برسند. نکته قابل توجه، نشست رخ داده در نقاط ۷، ۱۰ و ۱۴ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیش از نزدیک شدن جبهه‌کار به این نقاط، نشست قابل توجهی از خود نشان داده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر

سازه‌های زیرزمینی چندگانه در این محدوده و القاء نشست توسط حفر تونل خط ۷ است همان‌طور که بیان شد تنها افزایش فشار جبهه‌کار در این محدوده از مسیر تونل نمی‌تواند نشست‌های ایجاد شده را تقلیل و به مرز مجاز وارد نماید و موجب پایداری جبهه‌کار تونل شود بنابراین با در نظر گرفتن موقعیت شرح داده شده در این منطقه علاوه بر افزایش فشار جبهه‌کار (با توجه به پارامتر اقتصادی)، باید تمهیدات به‌سازی منطقه‌ای در این محدوده انجام شود.



شکل ۹: شروع نشست پس از عبور جبهه‌کار تونل از چهارراه مولوی (بین‌های ۱ تا ۹)



شکل ۱۰: شروع نشست پس از عبور جبهه‌کار تونل از چهارراه مولوی (بین‌های ۱۰ تا ۱۸)

#### ۷- نتیجه‌گیری

با توجه به ویژگی‌های تونل‌سازی سپری، از این روش در مقیاس وسیع برای حفر تونل در خاک‌های نرم، حفاری‌های کم‌عمق و حفر تونل در محیط‌های شهری استفاده می‌شود. از مهم‌ترین گام‌هایی که در موفقیت پروژه‌های تونل‌سازی سپری دخیل است کنترل نشست سطح زمین و جلوگیری از آسیب بر ساختمان‌های اطراف تونل است. همواره تونل‌سازی با تغییراتی در وضعیت تنش‌های زمین و تغییر شکل‌های آن همراه است. یکی از مسایل همراه با تونل‌سازی نشست زمین بوده که در صورت تجاوز از حد مجاز باعث آسیب به سازه‌های سطحی می‌شود. در این تحقیق نشست حاصل از حفر تونل خط ۷ مترو تهران در دو مقطع به روش تحلیلی و عددی بررسی شد. بدین منظور نشست رخ داده بر روی محور

تونل، دو طرف تونل و سازه‌های اطراف اندازه‌گیری شد و نتایج زیر به دست آمد:

- نشست‌های رخ داده در دو طرف محور تونل تقریباً متقارن بوده به غیر از مکان‌های نزدیک به ساختمان‌های چند طبقه که باعث القای بار و نشست بیشتری می‌شوند.
- در محدوده‌های ترافیکی و در حضور فضاهای زیرزمینی متعدد، پیش از رسیدن جبهه‌کار تونل به نقاط مورد نظر، نشست قابل توجهی رخ داده که نیازمند تمهیدات ویژه و افزایش فشار جبهه‌کار است.
- برای محدوده‌ی مسیر در کیلومتر ۱۰+۵، مقدار کمینه و بیشینه نشست به روش تحلیلی به ترتیب ۴۶ و ۶۴

قسمت برش دستگاه حفاری و تحمیل هزینه‌های زیاد به همراه ائتلاف زمان برای تعمیر شود.

● قسمت عمده‌ی نشست‌ها مربوط به دو بخش نشست ناشی از پیش آمدگی سینه‌ی حفاری و نشست شعاعی اطراف شیلد است که در واقع بخش پیش آمدگی سینه‌ی حفاری حدود ۳۵ تا ۵۰ درصد کل نشست و بخش نشست شعاعی اطراف شیلد حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد نشست کل را به خود اختصاص داده است و کمتر از ۲۰ درصد از نشست کل را دو بخش نشست ناشی از تزریق گروت و نشست ناشی از تغییر شکل‌های پوشش سگمندی تشکیل می‌دهد.

#### ۸- تشکر و قدردانی

از کلیه‌ی مسئولین و مهندسان مؤسسه‌ی مهندسی مشاور ساحل به سبب همکاری در مراحل تحقیق و در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم تشکر و قدردانی می‌شود.

#### منابع

- [1] Litwinski, J., 1956, "Application of the equation of stochastic processes to mechanics of loose bodies. Arch". Mech. Stosow, **8**: pp. 396- 411.
- [2] Peck, R. B, 1969, "Deep excavations and tunneling in soft ground", in Proc. 7' mlt. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering.. Mexico City.
- [3] Cording, E. J. and Hansmire, W. H, 1975, "Displacements around soft ground tunnels", in 5'h American Conference on Soil MEchanics and Foundation Engineering.
- [5] O'Reilly, M. P., and New, B.M., 1982, "Settlement above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction. Tunnelling",. **88**: pp. 231- 241.
- [6] Attewell, P. B. and Woodman, J. P., 1982, "Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil", Ground Engineering., **15**(8): pp. 13- 22.

میلی‌متر و به روش عددی ۴۳/۷۵ میلی‌متر برآورد شدند که در محدوده‌ی مجاز قرار ندارند. بنابراین برای کنترل نشست، افزایش فشار جبهه‌کار با ضرایب ۱/۶ و ۱/۸ برای اتاق چمبر در نظر گرفته شد. با توجه به آن نشست حاصل در محدوده‌ی مجاز قرار گرفت و مقادیر فشار تدقیق شده این اعمال ضریب را تأیید می‌کنند.

● برای محدوده‌ی مسیر در کیلومتر ۹+۹۰۰، میزان نشست به روش تحلیلی در حالت کمینه، ۲۸ میلی‌متر و در حالت بیشینه، ۳۹ میلی‌متر تخمین زده شد. همچنین میزان نشست به روش عددی، ۴۱/۷۴ میلی‌متر محاسبه شده است که خارج از محدوده‌ی مجاز است (کمینه فشار تخمین زده شده‌ی جبهه‌کار ۷۵ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۲۵ کیلوپاسکال برآورد شده بود). بنابراین برای کنترل نشست، حالت بیشینه ممکن دستگاه حفاری (فشار جبهه‌کار برابر ۱۸۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق برابر ۲۸۰ کیلوپاسکال) در نظر گرفته شد که با توجه به آن میزان نشست به مقدار ۳۷/۳۰ میلی‌متر تقلیل یافت. هرچند امکان کاهش نشست در این مقطع تا حد مجاز وجود نداشت اما به هر حال این امر موجب کاهش نشست و نزدیک شدن آن به حدود مجاز شد.

● نقاط ۷، ۱۰ و ۱۴ از مجموعه پین‌های رفتارنگاری نشست بالایی را نشان می‌دهند که ناشی از حضور تونل رباط‌کریم، گالری‌های خط ۳ و چاه‌های آب رباط‌کریم و تخریب چاه‌های جذبی در قسمت جنوبی است. به همین دلیل است که بالا بردن فشار جبهه‌کار جهت پایداری جبهه‌کار تونل تأثیر زیادی در کاهش نشست نداشت و بنابراین بایستی در این منطقه به‌سازی خاک انجام شود تا جبهه‌کار پایدار مانده و نشست‌ها در محدوده‌ی مجاز قرار گیرند.

● اگرچه فشارهای بالای نگهدارنده‌ی جبهه‌کار، باعث کنترل نشست در سطح زمین می‌شود و در نهایت کنترل جبهه‌کار خواهد شد، اما اعمال فشارهای خیلی زیاد علاوه‌بر ایجاد بالازدگی‌های سطحی جزئی می‌تواند باعث تخریب

- [11] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S., 2007, "*Mechanized tunnelling in urban areas*", Taylor & Francis.
- [12] Eurocode 7: Geotechnical Design, in BS EN 1977-1:2004, B. Standard, Editor.
- [13] Burland, J. B., Standing, J. R. and Jardine, F. M., 2001, "*Building Response to Tunnelling*", Tomas Telford.
- [14] Peng, S. S., "*Surface subsidence engineering*", 1992, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- [7] Aoyagi, T., 1995, "*Representing settlement for soft ground tunneling*", , Massachusetts Institute of Technology.
- [8] Wu, B. R. and Lee, C. J., , 2003, "*Ground movements and collapse mechanisms induced by tunneling in clayey soil*", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics. **4**: pp. 15- 29.
- [9] Sahel Consulting Engineers, 2011, "*Engineering Report of the Eastern-Western Part of Tehran Subway Line 7 . Tehran, Iran*": Sepasad Engineering Company.
- [10] He, C., Feng, K., Fang, Y. and Jiang, Y.C., 2012, "*Surface settlement caused by twin parallel shield tunnelling in sandy cobble strata*", Applied Physics & Engineering, **13**(11): pp. 858- 869.

#### پانوشته‌ها:

- <sup>1</sup> - Litwinskiy
- <sup>2</sup> - Peck
- <sup>3</sup> - Cording & Hansmire
- <sup>4</sup> - O'Reilly and New
- <sup>5</sup> - Attewell and Woodman
- <sup>6</sup> - Aoyagi & Enstein
- <sup>7</sup> - Decision Aid Tunnelling
- <sup>8</sup> - Wu and Lee
- <sup>9</sup> - HE
- <sup>10</sup> - Burland