

## برآورد تحلیلی و عددی نشست زمین و مقایسه با نتایج ابزار دقیق (مطالعه موردی؛ تونل خط ۲ متروی کرج)

علیرضا رستمی\*<sup>۱</sup>، سینا رستم آبادی<sup>۲</sup>، نوید حسینی<sup>۲</sup>، محمد خسرو تاش<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۳- گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۴- هیات علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

(\*#عهده دار مکاتبات - Alireza.Rostami.ar@gmail.com)

### چکیده

از مهم ترین مسائلی که می بایست در حین ساخت تونل های شهری مورد بررسی قرار گیرد، برآورد میزان نشست و کنترل زمین به هنگام حفر تونل می باشد. در این مقاله با توجه به مشخصات گمانه های خط ۲ متروی کرج، ابتدا با روش تحلیلی بابت، نشست بیشینه ناشی از حفر تونل مورد محاسبه قرار گرفته و با استفاده از رابطه تجربی پک (Peck) پروفیل عرضی نشست ترسیم شده است، سپس محدوده مورد نظر در نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel مدل سازی شده و این بار با به کارگیری روش عددی المان محدود پروفیل نشست عرضی ارائه شده است، در انتها نتایج حاصل از روش های تحلیلی و عددی با نتایج حاصل از رفتار نگاری و ابزار دقیق در حین اجرای پروژه مقایسه شده است. نتایج این بررسی ها نشانگر میزان همپوشانی نسبی این روش ها، با دقت بالاتر روش عددی می باشد. اما نه تنها روش تحلیلی رد نمی شود، بلکه جهت تخمین نشست احتمالی در شرایط اولیه ضروری به نظر می رسد.

**واژگان کلیدی:** نشست بیشینه، روش تحلیلی بابت، رفتار نگاری و ابزار دقیق.

### ۱- مقدمه

حفر تونل های مترو به دلیل نزدیکی به سطح زمین و قرار گیری در رسوبات منفصل شهری پدیده نشست را به همراه دارد. بعد از حفر تونل بخشی از محیط (خاک) حذف شده و باعث ایجاد دگرگونی در وضعیت تنش منطقه می شود که این امر پدیده نشست را به دنبال دارد. این پدیده باعث ایجاد تغییر شکل در سازه های سطحی مانند ساختمان ها، پل ها، خیابان ها و معابر می شود. با توجه به عبور تونل های مترو از مجاورت ساختمان ها، ابنیه های تاریخی و غیره بررسی و برآورد دقیقی از میزان نشست زمین جهت تعیین گام پیشروی، زمان نصب سیستم نگهداری و طراحی سیستم نگهداری امری ضروری بوده که توجه کارشناسان را به این مسئله معطوف می کند. روش های محاسبه نشست به سه گروه اصلی تقسیم می شوند که عبارتند از: روش های تجربی، تحلیلی و عددی. از جمله روش های تحلیلی برآورد نشست زمین، می توان به روش های Bobet (۲۰۰۱)، Oteo و Moya (۱۹۷۹)، Sagaseta و Gonzalez (۲۰۰۲) و Loganathan و Poulos (۱۹۹۸)، Park (۲۰۰۵) و Verruijt و Booker (۱۹۹۶) و Melis (۲۰۰۲) اشاره نمود. یکی از روش های تحلیلی که بر تئوری های الاستیسیته استوار است و برای تخمین میزان نشست سطحی در خاک ایزوتروپیک و هموزن غیرقابل تراکم بکار گرفته شد، روش Sagaseta (۱۹۸۷) می باشد Verruijt و Booker (۱۹۹۶) نیز در شرایط فوق و با فرض تغییر شکل دایره ای فضای اطراف محیط حفاری، پیش بینی اولیه ای از میزان نشست سطحی زمین ارائه دادند که از دقت لازم جهت مقایسه با مقدار واقعی نشست برخوردار نبود. با در

دست داشتن پارامترهای مکانیکی و پروفیل‌های خاک می‌توان با مدلسازی صحیح در نرم افزارهای المان محدود، پیش‌بینی دقیقتری از نشست ارائه نمود که این کار توسط Oteo (۱۹۹۶) انجام شد. در ادامه Loganathan و Poulos (۱۹۹۸) با بکار بستن پارامتر گپ که ناشی از پارامترهای تغییر شکل سه بعدی فضای اطراف حفاری، گپ فیزیکی، مهارت کارکنان و نیز تأثیر خاک از دست رفته (افت حجمی) می‌باشد، پیش‌بینی میزان نشست برای رس‌های سخت را امکان پذیر نمودند که به علت ناکارآمدی این روابط برای رس‌های نرم، تحلیل‌های تکمیلی ادامه یافت. بعد از راه‌حل‌های Bobet (۲۰۰۱) در شرایط الاستیک برای مقاطع دایره‌ای، Park (۲۰۰۴) راه‌حلی اصلاحی برای تغییر شکل‌های بیضوی برای رس‌ها در شرایط الاستیک ارائه کرد. Melis (۲۰۰۲) نیز با بکارگیری اکثر این روش‌ها مثل ساگاستا، پارک، اوتسو، لوگاناتان و پولوس، روش مدلسازی عددی و با کنترل اطلاعات پروژه‌های دیگر میزان نشست سطحی را پیش‌بینی کرد.

در کنار روش‌های اصلی محاسبه نشست، استفاده از ابزار دقیق و رفتار سنجی در حین اجرای پروژه نیز می‌تواند نقش مهمی را در برآورد میزان نشست و کنترل زمین ایفا نماید.

در این تحقیق نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی (روش المان محدود؛ نرم افزار ( PLAXIS 3D Tunnel) با نتایج حاصل از رفتار نگاری و ابزار دقیق در حین اجرای پروژه مقایسه شده است. مطالعات مربوط به نشست با توجه به مشخصات گمانه ... خط ۲ متروی کرج صورت گرفته است.

## ۲- روش تحلیلی بابت

روش تحلیلی Bobet (۲۰۰۱) برای محاسبه نشست بیشینه در اثر ساخت تونل‌ها ارائه گردیده است. این روش برای تونل‌هایی صادق است که نسبت عمق به شعاع تونل بیش از ۱.۵ باشد، زیرا در غیر این صورت تأثیر سطح زمین وجود داشته و همچنین محدوده، هموژنز و ایزوتروپیک بوده و در حین عملیات حفاری، خاک از دست رفته<sup>۱</sup> وجود خواهد داشت. در تمام مراحل تحلیل، لاینینگ (پوشش بتنی) بینهایت انعطاف پذیر و غیر قابل تراکم فرض شده است ( $C = 0, F = \infty$ ). روابط تحلیلی بابت برای حالات کوتاه مدت و بلند مدت جهت محاسبه نشست بیشینه در زمین‌های خشک، زمین‌های اشباع و حفاری با اعمال هوای فشرده و بدون اعمال هوای فشرده، تونل‌های با گپ فیزیکی و بدون گپ فیزیکی ارائه شده‌اند. در عملیات تونلسازی بدون اعمال هوای فشرده، اجرای لاینینگ همزمان با حفاری انجام می‌شود، به این دلیل میزان نشست کلی و آبی، کمتر از حالت حفر تونل با اعمال هوای فشرده خواهد بود، زیرا در این حالت از هوای فشرده جهت کنترل فشار آب استفاده می‌شود و سپس عملیات لاینینگ انجام می‌شود. در روش حفاری با اعمال هوای فشرده، فشار هوای اعمالی در حین عملیات حفر، نزدیک به فشار آب منفذی است. از آنجایی که پراکندگی فشار منفذی و فشار آب پس از حفر در نهایت به تعادل می‌رسد، فشار وارده بر لاینینگ ثابت بوده و به فشارهای داخلی زمین بستگی ندارد (Bobet, 2001).

نشست بیشینه زمانی رخ می‌دهد که شعاع تونل با عمق (فاصله محور تونل از سطح زمین) برابر باشد. نشست بیشینه در راستای تاج تونل به وقوع خواهد پیوست. همچنین برای حالتی که زمین خشک است طبق رابطه بابت خواهیم داشت (Bobet, 2001):

$$\delta_{max} = -\frac{wv_0}{h} + \frac{1+v}{E} \left\{ \gamma v_0^2 \left[ \frac{1}{8} \left( k - \frac{v}{1-v} \right) \left( \frac{r_0}{h} \right)^2 - \frac{1}{4} \frac{1-4v}{1-v} \ln h \right] + \gamma h (1-k) v_0 \left[ -2(1-v) \frac{r_0}{h} + \frac{1}{8} (9-4v) \left( \frac{r_0}{h} \right)^2 - \frac{1}{4} \left( \frac{r_0}{h} \right)^4 \right] \right\} \quad (1)$$

در رابطه (۱) داریم:  $\sigma_{max}$  نشست بیشینه سطح زمین،  $W$  میزان گپ بین زمین و پوشش بتنی،  $\gamma$  شعاع تونل،  $E$  مدول الاستیسیته خاک،  $V$  وزن مخصوص کل خاک،  $h$  عمق تونل و  $k$  ضریب فشار زمین در حالت سکون (نسبت تنش افقی به قائم) (Bobet, 2001).

همچنین در مورد رابطه (۱) می‌توان نکات زیر را ارائه نمود:

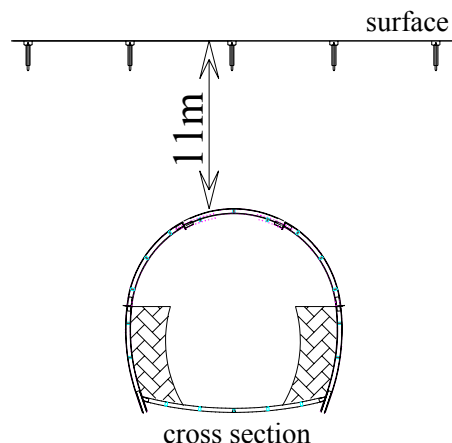
۱. میزان گپ بین زمین و پوشش بتنی از عوامل مؤثر در میزان نشست بیشینه می‌باشد.
۲. با افزایش شعاع تونل میزان نشست بیشینه افزایش یافته و با افزایش عمق این میزان کاهش می‌یابد.
۳. در صورتی که ضریب فشار زمین ( $k$ ) کمتر از یک باشد نشست بیشینه افزایش و چنانچه بیشتر از یک باشد میزان نشست بیشینه کاهش خواهد یافت.

### ۳- روش اجرای تونل و موقعیت ابزار دقیق در پروژه متروی کرج

روش حفاری و اجرای تونل روش جدید اتریشی<sup>۱</sup> است که در دو مرحله حفاری بخش فوقانی و تحتانی صورت می‌پذیرد. این روش یک رهیافت تجربی- علمی است که مبنای تئوری نیز دارد و آن ارتباط بین تنش‌ها و تغییر شکل‌های اطراف تونل (منحنی عکس العمل زمین)<sup>۲</sup> است. در این روش از ابزاربندی دقیق و رفتارسنجی برجا استفاده می‌شود و تغییر و تفسیر اندازه‌گیری‌ها به طور علمی انجام می‌گیرد. روش جدید اتریشی شامل ترکیبی از روش‌های حفاری و تونلسازی است، اما تفاوت آن با سایر روش‌ها به کارگیری رفتارسنجی مداوم و حرکت لایه‌ها و بازنگری سیستم نگهداری برای دستیابی به اقتصادی ترین و پایدارترین روش نگهداری است. ماشین آلات مورد استفاده جهت حفاری تونل در این پروژه عبارتند از: بیل مکانیکی و لودر. سازه تونل یک حلقه بیضی شکل از بتن مسلح به عرض ۸.۴ متر و ارتفاع ۷.۸ متر است که در اعماق ۱۴ تا ۲۰ متری از سطح زمین واقع است. سیستم نگهداری موقت نیز شامل تیس، مش فولادی و شانکریت به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد (گزارشات مربوط به رفتار سنجی و ابزار دقیق، شرکت مهندسی مشاور تونل راد).

ایستگاه‌های نشست سنجی در خیابان و روی تونل به صورت پنج نقطه‌ای قرار می‌گیرند به این ترتیب که یک نقطه روی محور تونل و دو نقطه در فاصله ۷.۵ متری از محور تونل نصب می‌شوند (شکل ۱).

سعی شده که ایستگاه‌های نشست سنجی در محل ایستگاه‌های تقارب سنجی بوده و در سطح خیابان نصب شوند. نکته قابل توجه در ایستگاه‌های نشست سنجی عبور از لایه ضخیم آسفالت و زیرسازی خیابان و اندازه‌گیری نشست زمین طبیعی محدوده تونل می‌باشد. علاوه بر ایستگاه‌های نشست سنجی فوق جهت کنترل نشست ساختمان‌های مسیر تونل، برای ساختمان‌های مهم اطراف، شاخص‌های کنترل نشست نصب می‌گردد. با استفاده از یک برنامه زمانی مناسب جهت نصب و قرائت، که قبل و بعد از احداث فضای زیر زمینی انجام می‌پذیرد (بدین ترتیب که جلوتر از جبهه کار پیشروی پین‌ها در سطح خیابان نصب می‌گردند) وضعیت زمین دست نخورده اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد، کم‌کم با پیشروی تونل و نزدیک شدن آن به پین‌های یاد شده تأثیر احداث تونل در جلوی خود و همینطور با گذشت تونل از موقعیت یاد شده، تغییرات رخ داده در سطح زمین و لایه‌های زیر سطحی، ثبت خواهد گشت و می‌توان مقایسه و بررسی کاملی از نشست انجام داد.



شکل ۱: نحوه قرارگیری پین‌های نشست سنجی نسبت به موقعیت تونل

با اندازه‌گیری‌های مرتب و دوره ای خطرات احتمالی و نیز تأثیر گذشت زمان بر روی لایه‌ها مشخص خواهد گشت. قرائت به وسیله یک دوربین با دقت مناسب (حدود ۰.۱ میلی‌متر) بصورت دوره‌ای انجام می‌گیرد، در صورت مشاهده اختلاف تراز پین‌ها نسبت به یکدیگر، می‌توان به نشست یا بالا زدگی لایه‌های خاک پی برد (Oteo and Moya, 1979).

#### ۴- معرفی پروژه متروی کرج و مشخصات ژئومکانیکی ساختگاه

خط ۲ متروی کرج از کمال شهر شروع شده و پس از عبور از خیابان‌های شهید بهشتی (قزوین سابق) و طالقانی جنوبی و امتداد تا میدان امام حسین (ع) به سمت ایستگاه متروی کرج- صادقیه گسترش یافته و سپس تا منطقه ملارد ادامه می‌یابد.

لایه‌های شناسایی شده از خاک زیر سطحی محدوده مورد بررسی را می‌توان در سه گروه لایه‌های خاک دستی، خاک ریزدانه و خاک درشت دانه طبقه بندی نمود. بررسی بر روی گمانه‌های حفاری شده در این محدوده نشان می‌دهد این رسوبات اغلب از خاک دانه درشت شن و ماسه تشکیل شده که با حرکت به سمت شرق ساختگاه و با دور شدن از قسمت‌های مرکزی مخروط افکنه کرج مصالح ریز دانه تر شده است، و از دیدگاه مکانیکی دارای مقاومت بالایی است.

ضخامت خاک دستی در محدوده ۱ الی ۲ متر در ساختگاه مشاهده گردیده است. دانه بندی خاک دستی در نقاط مختلف از شن و ماسه (زیر خیابان‌ها) تا رس (در فضای سبز) متغیر بوده است. در برخی مناطق شرقی ساختگاه خاک دستی دارای قطعات درشت قلوه سنگی نیز می‌باشد.

در نواحی شرقی تا مرکزی از لایه‌های خاک اغلب ریزدانه رسی، گاهی ماسه یا لای دار و به ندرت ماسه رسی و لای دار، مرطوب، بسیار سفت تا سخت و به رنگ قهوه‌ای تشکیل گردیده است. ضخامت این لایه در نواحی مختلف بین صفر تا ۱۵ متر متغیر می‌باشد.

قسمت تحتانی خاک زیر سطحی در محدوده غربی و مرکزی و تقریباً کل بافت خاک محدوده شرقی ساختگاه از لایه‌های خاک درشت دانه اغلب گرد گوشه شن و ماسه و رس و گاهی لای دار، با تراکم متوسط تا بسیار متراکم و به رنگ خاکستری و گاهی قهوه‌ای و در عمده قسمت‌ها همراه با قطعات درشت قلوه سنگ همراه می‌باشد، تشکیل گردیده است. جنس دانه‌های این لایه عمدتاً آذرآواری، کوارتز و سیلیس دار می‌باشد. این لایه ها دارای حداقل ضخامت ۱۰ متر بوده و تا انتهای عملیات حفاری مشاهده شده اند.

مشخصات ژئومکانیکی مقطع مورد بررسی جهت برآورد میزان نشست مطابق با جدول (۱) می‌باشد (Oteo and Moya, 1979).

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی مقطع مورد بررسی (Melis, 2002)

وزن مخصوص طبیعی (gr/cm <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> )	نسبت پواسون (بدون واحد)	چسبندگی (kg/cm <sup>2</sup> )	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	نفوذپذیری قائم (m/day)	نفوذپذیری افقی (m/day)
۱.۹۵	۳۰۰	۰.۳	صفر	۳۲		

### ۵- برآورد تحلیلی میزان نشست

در این مقاله ابتدا توسط رابطه (۱) (رابطه تحلیلی بابت)، نشست بیشینه در مقطع مورد نظر مورد محاسبه قرار گرفته و پروفیل نشست عرضی تا فاصله ۵۰ متری از محور تونل به کمک رابطه تجربی ارائه شده توسط پک (۱۹۶۹) ترسیم شده است؛ رابطه (۲). همچنین آنالیز حساسیت روی پارامترهای گپ، عمق تونل و ضریب فشار زمین صورت گرفته و پروفیل‌های مربوطه ارائه شده است.

$$S = S_{max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2f^2}\right) \quad (2)$$

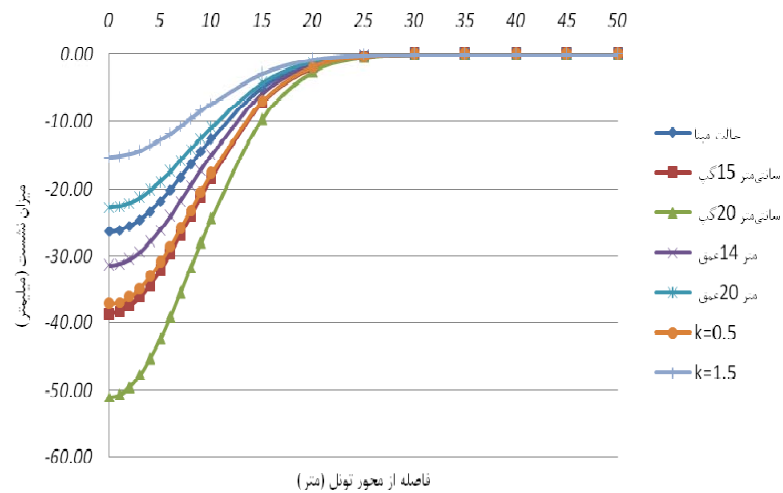
در رابطه فوق داریم:  $S$  میزان نشست در نقطه مد نظر،  $S_{max}$  نشست بیشینه (بدست آمده از رابطه (۱))،  $x$  فاصله از محور تونل و  $f$  نقطه عطف منحنی نشست بدست آمده از روابط ارائه شده در جدول (۲). در مرحله بعد مقطع مورد بررسی در نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel مدل‌سازی شده و این بار با به کار گیری روش عددی المان محدود میزان نشست مورد محاسبه قرار گرفته است. در انتها نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی با نتایج حاصل از رفتار نگاری و ابزار دقیق در حین اجرای پروژه مقایسه شده است.

جدول ۲: روابط ارائه شده جهت محاسبه نقطه عطف منحنی نشست (ستاری و همکاران، ۱۳۸۸)

ارائه دهنده	رابطه
Peck, 1969	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^n ; n = 0.8 - 1$
Mail, 1983	$i = 0.5Z_0$
Leach, 1985	$i = 0.57 + 0.45(Z_0 - Z) \pm 1.01$ $i = 0.64 - 0.48Z \pm 0.91$
Arioglu, 1992	$i = 0.386Z_0 + 2.84$ $i = 1.392 R \left(\frac{Z_0}{D}\right)^{0.704}$
Lee, 1999	$\frac{i}{R} = 0.58 \left(\frac{Z_0}{2R}\right) + 1.0$

### ۵-۱- نتایج حاصل از روش تحلیلی بابت

در حالت مبنا میزان پارامتر گپ ۱۰ سانتی‌متر، عمق محور تونل ۱۷ متر و ضریب فشار زمین یک در نظر گرفته شده. آنالیز حساسیت روی پارامترهایی که قبلاً ذکر شد، صورت گرفته و نتایج در شکل (۲) قرار داده شده است.

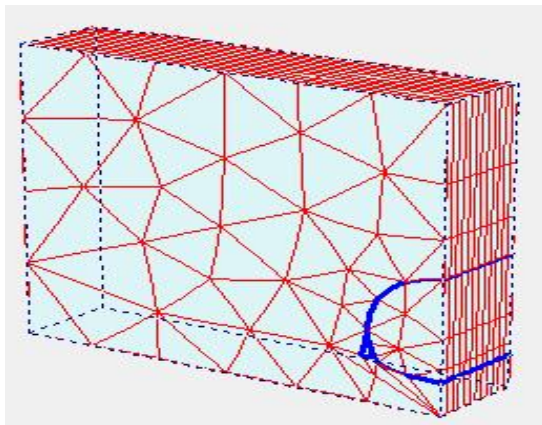


شکل ۲: پروفیل عرضی نشست و نتایج آنالیز حساسیت

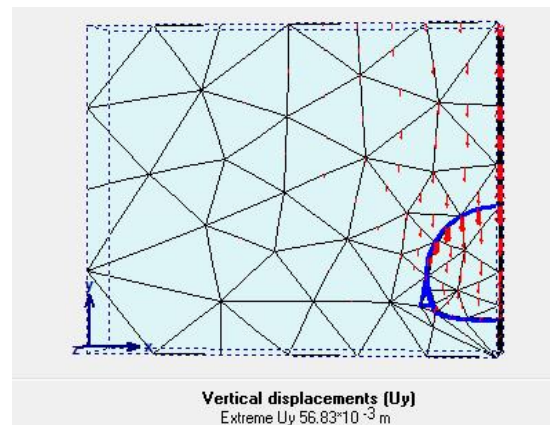
نتایج تغییرات در میزان پارامترهای موثر بر نشست سطحی نشان می‌دهد میزان گپ بین زمین و پوشش بتنی بالاترین حساسیت را داراست.

#### ۶- برآورد عددی میزان نشست

برای تحلیل عددی از نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel استفاده شده است. در شکل (۳) مقطع مورد بررسی، مطابق با تونل خط دو متروی کرج که در محیط نرم افزار مدل شده است مشاهده می‌شود.

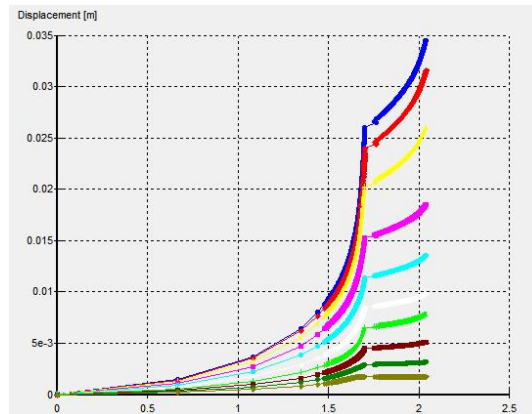


شکل ۴: مدل سازی حفاری و لاینینگ



شکل ۳: مدلی از مقطع تونل خط دو متروی کرج

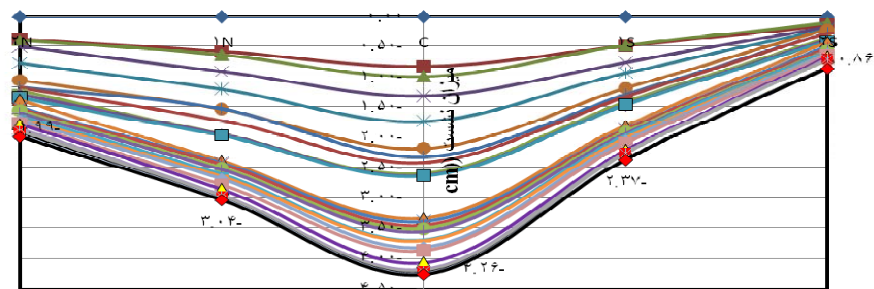
برآورد عددی نشست توسط نرم افزار با میزان پیشروی شش متر محاسبه شده است. این مدل در شکل (۴) مشاهده می‌شود. حداکثر میزان نشست پس از حفاری و بتن ریزی، ۳.۵ سانتی متر بر روی محور تونل بدست آمده است. شکل (۵) میزان نشست در فاصله‌های صفر تا ۳۰ متری از مرکز تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۵: جابجایی عمودی از مرکز تونل تا فاصله ۳۰ متری

### ۷- میزان نشست ثبت شده توسط ابزار دقیق

نمودارهای شکل (۶) مربوط به میزان نشست سطحی از تاریخ ۸۷/۱۱/۲۸ تا تاریخ ۸۹/۰۲/۲۵ یعنی حدود ۱۵ ماه از آغاز حفاری که شامل عملیات حفاری فوقانی، شاتکریت و نگهداری، حفاری تحتانی، نگهداری و عملیات لاینینگ، که تا به تعادل رسیدن تنش‌های اطراف فضای حفاری و ثابت شدن نشست سطحی ادامه یافته، می باشد.



شکل ۶: میزان نشست‌های ثبت شده در ایستگاه ۱+۴۵۱ در طول ۱۵ ماه (Oteo and Moya, 1979)

بیشترین مقدار نشست ثبت شده توسط ابزار دقیق، پس از تعادل تنش‌های القایی و ثابت شدن نشستها ۴.۲ سانتی متر می باشد.

### ۸- مقایسه روش‌های تحلیلی، عددی و میزان همپوشانی و قابلیت اعتماد این روش‌ها

نشست بدست آمده از روش تحلیلی بابت در حالت مبنا ۲.۶ سانتی متر و میزان نشست به روش عددی ۳.۵ سانتی متر محاسبه شده است. اما نشست واقعی ثبت شده توسط ابزار دقیق ۴.۲ سانتی متر می باشد؛ برای تکمیل روش تحلیلی به کار رفته و پی بردن به میزان همپوشانی نتایج عملی بدست آمده توسط ابزار دقیق بانسبت محاسبه شده توسط روش تحلیلی، لازم بود این شرایط در نرم افزار مدل گردد، تا به صورت عددی و با استفاده از معادلات المان محدود نیز محاسبه شود، که با توجه به نتیجه محاسبات و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق، روشن است که روش عددی از دقت بالاتری برخوردار است. اما نتایج روش تحلیلی برای ارائه پیش بینی اولیه از میزان نشست سطحی ضروری به نظر می رسد.

## ۹- نتیجه گیری

با توجه به گزارشات ژئوتکنیکی منطقه و اعلام میزان ناچیز چسبندگی (در حد صفر)، نشست سطحی می تواند بیشتر از موارد دیگر باشد. و با افزایش میزان چسبندگی میزان نشست در محل های دیگر کاهش می یابد، بنابراین نیاز به مطالعات و آزمایشات دقیقتر ژئوتکنیکی ضروری به نظر می رسد. آنالیز حساسیت نشان می دهد تاثیر مدول یانگ در میزان نشست سطحی به مراتب بیشتر از تغییرات چسبندگی خاک می باشد. نتایج حاصل از محاسبات عددی (نرم افزار المان محدود) بیانگر این است که، با افزایش تدریجی وزن مخصوص خشک و اشباع خاک، پهنای منحنی نشست افزایش و از میزان نشست سطحی ماکزیمم در روی محور تونل کاسته می شود و حتی در مقادیر بالای وزن مخصوص اشباع بالازدگی سطح زمین را خواهیم داشت. همچنین انجام پیوسته، اجرای متناوب و بدون وقفه عملیات تونلسازی و کوتاه کردن زمان رسیدن به مرحله بستن کف و ایجاد حلقه کامل لاینینگ از شدت تاثیر تنش های القایی و تغییر شکل گسترده در فضای اطراف تونل و همچنین از میزان نشست آبی در سطح زمین می کاهد.

## منابع

۱. ستاری، ق. اسدی، ا. شهریار، ک. زمانی، ح.، (۱۳۸۸). برآورد عددی و تحلیلی نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی با سپر تعادلی، مطالعه موردی؛ خط هفت متروی تهران. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ۲۹-۳۱ اردیبهشت ماه. صفحات ۱۲۳-۱۲۹.
2. Bobet, A., 2001. Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground, J.Eng. Mech. Div. ASCE 127 (12), 1258-1266.
3. Gonzalez, C. and Sagaseta, C., 2001, Patterns of soil deformations around tunnels, Application to the extension of Madrid Metro. Computers and Geotechnics, 28: 445- 468.
4. Loganathan, N. and Poulos, H. G., 1998, Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(9): 846-856.
5. Melis, M., 2002, Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension , Geotech. J. 39: 1273-1287.
6. Park, H.H., 2005, Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays, Tunnelling and Underground Space Technology 20, 249-261.
7. Oteo, C. and Moya, J. F., 1979, Evaluacion de parametros del suelo de Madrid con relacion a la construccion de tunnels, In Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, Vol. 3, pp. 239-247.
8. Verruijt, A. and Booker, J. R., 1996, Surface settlement due to deformation of a tunnel in an elastic half plane, Geotechnique, 46(4): 753-757.