



## برآورد میزان نشست فضا ۲ مترو کرج با استفاده از روش‌های

### تأمیلی و عددی

سینا رستم آبادی<sup>۱</sup>، مهدیار درگاهی<sup>۱</sup>، احمدا سدی<sup>۱\*</sup> و محمد خسروتاش<sup>۲</sup>

(<sup>۱</sup>) باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، ایران

mah.dargahi@gmail.com

a\_asadi@azad.ac.ir

(<sup>۲</sup>) امور طرح‌های تونل و سازه‌های زیرزمینی، شرکت سایبر، تهران، ایران

mo\_khosrotash@yahoo.com

(\* عهده دار مکاتبات)

دریافت: ۹۲/۱۰/۲۲؛ دریافت اصلاح شده: ۹۳/۷/۲۵؛ پذیرش: ۹۳/۲/۲۲؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۴/۸/۳۰

### چکیده

امروزه با توجه به افزایش جمعیت در شهرها، احداث تونل‌های زیرزمینی به منظور کاهش ترافیک و حمل و نقل امری ضروری است. این مقاله حاصل تحقیق برآورد نشست در جریان احداث خط ۲ متروی کرج است. در این تحقیق ابتدا به وسیله رابطه تأمیلی بابت میزان نشست در خط ۲ متروی کرج برآورد گردید و پروفیل عرضی نشست زمین به وسیله رابطه پیک رسم شد. در ادامه، تونل با استفاده از نرم افزار PLAXIS 2D مدل سازی شده و میزان نشست زمین با روش عددی المان محدود برآورد گردید. حداکثر نشست با رابطه تأمیلی بابت حدود ۳/۱ سانتی متر، با روش عددی المان محدود با اعمال بار ترافیکی حدود ۴/۹ سانتی متر و بدون اعمال بار ترافیکی ۴ سانتی متر برآورد گردید. میزان نشست اندازه گیری شده با ابزار دقیق پروژه نیز نزدیک به نتایج بدست آمده می باشد. روش به کار رفته در این تحقیق نشان می دهد که اگرچه مقدار نشست برآورد شده به روش عددی به مقدار واقعی نزدیکتر است، اما استفاده از هر دو روش تأمیلی و عددی برای برآورد میزان نشست زمین در اثر ساخت این تونل امکان پذیر می باشد.

**واژه‌های کلیدی:** برآورد نشست، روش تأمیلی بابت، روش عددی المان محدود، ابزار دقیق، خط ۲ متروی کرج.

### ۱- مقدمه

- شهری می توان به:
- فروپاشی جبهه کار حفاری و شکست نگهدارنده اصلی،
  - نشست سطحی بیش از اندازه و در نتیجه آسیب یا تخریب ساختمان،
  - خسارت تحرکات نشست به -سیسات سطحی و زیرزمینی،
  - مرگ یا جراحت کارگران، مهندسان و شهروندان،
- ساخت تونل‌های شهری به علت شرایط خاص زمین شناسی و ژئوتکنیکی زمین، وجود ساختمان‌ها و تاسیسات سطحی و زیرزمینی و محدودیت‌های ترافیکی، مخاطرات خاص خود را دارا می باشد. از جمله مخاطرات اصلی در پروژه‌های تونلسازی بخصوص تونل سازی

● ضرر اقتصادی به اموال و یا سرویس های شهری،  
 ● اثرات زیست محیطی از قبیل انتشار مواد سمی، قابل اشتعال و یا مضر،  
 ● تاخیر پروژه و در نتیجه ضرر اقتصادی به اشخاص ثالث و  
 ● از دست دادن اعتماد عموم مردم که ممکن است به تحرکات سیاسی منجر شود اشاره نمود. (Ghorbani 2012).

بر این اساس، نشست سطح زمین در اثر حفر تونل در مناطق شهری از جمله مخاطرات اصلی در تونل سازی می باشد. با افزایش ساخت تونل های شهری، در چند دهه اخیر توجه محققین و مهندسان به انواع روش های برآورد و محاسبه میزان نشست زمین در اثر ساخت تونل های شهری افزایش چشمگیری داشته است. در یک طبقه بندی کلی می توان گفت روش های برآورد و محاسبه نشست زمین در اثر ساخت تونل ها به روش های تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم می شود. از قدیمی ترین روش های تجربی می توان به رابطه پک (Peck 1969) اشاره کرد که برای اولین بار به منظور برآورد میزان نشست زمین در اثر تونل سازی در سال ۱۹۶۹ ارائه شد. بر اساس نظر پک منحنی نشست زمین دارای یک توزیع نرمال بوده و به صورت گوسی می باشد. اتول و وودمن در سال ۱۹۸۲ (Attewell & Woodman 1982) دریافتند که تأثیر نشست طولی ناشی از تونل سازی با استفاده از یک منحنی توزیع تجمعی نرمال قابل نمایش است. از آنجا که رابطه ارائه شده توسط پک به صورت تجربی بوده و داده های اندازه گیری شده محدود بودند، این روش نمی توانست میزان دقیقی از نشست را ارائه دهد. ذکر این نکته ضروری است که میزان نتیجه بدست آمده از یک رابطه تجربی تا حد زیادی به مسائل زمین شناسی وابسته است.

در سال های اخیر، روش های تحلیلی بسیاری توسط محققین ارائه شده است. این روش ها، فرمول ها و روابطی را برای برآورد و محاسبه نشست زمین در اختیار مهندسين قرار می دهند. با استفاده از روش های ارائه شده توسط گزنالس و ساگاستا در سال های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۱ (Sagasetta 1987; Sagasetta & Gonzalez 2001) و ورویت و بوکر در سال ۱۹۹۶ (Verruijt & Booker 1996)، جابجایی عمودی و افقی برای خاک توسط روابطی که از مفروضات الاستیک خاک مشتق می شوند، بدست می آید. لگاناتان و پولوس در سال ۱۹۹۸ (Loganathan & Poulos 1998) با استفاده از معادله حرکت غیرخطی خاک و در نظر گرفتن پارامتر خاک از دست رفته، روابط ورویت و بوکر را اصلاح کرده و میزان نشست زمین (ناشی از

جابجایی عمودی) در حالت کوتاه مدت را بیان کردند. بابت در سال ۲۰۰۱ (Bobet 2001) روشی تحلیلی برای محاسبه نشست ماکزیمم در اثر ساخت تونل سازی سپری را ارائه کرد. پارک نیز در سال ۲۰۰۵ (Park 2005) روشی تحلیلی را برای محاسبه میزان نشست در زمین های رسی ارائه کرد. روش های تحلیلی اشاره شده در حالت زمین آزاد (بدون وجود سازه سطحی) میزان نشست را برآورد می کنند. پاتس و آدنبروک در سال ۱۹۹۷ (Potts & Addenbrooke 1997) با در نظر گرفتن سختی نسبی سازه - خاک روابطی را ارائه کردند که تأثیر حفر تونل و نشست زمین بر سازه های سطحی را قابل برآورد می کرد. این روش توسط فرانزیوس در سال ۲۰۰۳ (Franzius 2003) و دایموک و میر در سال ۲۰۰۸ (Dimmock & Mair 2008) مورد بررسی و اصلاحات بیشتری قرار گرفت.

میرحیبی و سروش نیز در سال های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ (Mirhabibi & Soroush 2012; Mirhabibi & Soroush 2013) با استفاده از روش عددی المان محدود، تأثیر سازه های سطحی بر میزان نشست زمین در اثر ساخت تونل های دوقلو را مورد بررسی قرار دادند. همچنین طالبی نژاد و همکارانش در سال ۲۰۱۳ (Talebinejad et al. 2013) با استفاده از روش عددی تفاضل محدود سه بعدی و مدل الاستیک - پلاستیک، جابجایی های سطحی و زیر سطحی را در تونل های با حفاری مرحله ای بررسی کردند.

در این مقاله با استفاده از رابطه تحلیلی بابت و نرم افزار المان محدود PLAXIS 2D، میزان نشست در محدوده متروی خط ۲ کرج برآورد گردید. در انتها نتایج با مقادیر اندازه گیری شده با ابزار دقیق پروژه مقایسه شدند.

## ۲- معرفی روش تحلیلی بابت

روش تحلیلی بابت در سال ۲۰۰۱، برای بررسی نشست و تغییر شکل های زمین در اثر حفر تونل در مناطق کم عمق و در محیط های اشباع با استفاده از روش تحلیلی که اینیستنو شوارتز برای تونل های عمیق در شرایط خشک ارائه داده بودند، توسعه داده شد. جزئیات مربوط به روش تحلیلی بابت در تصویر ۱ ارائه شده است. در این روش فرض بر آن است که تونل دایره ای، شرایط کرنش صفحه ای و تنش برشی در سطح تماس پوشش با دیواره صفر و نسبت عمق به

(Peck 1969). محققین روابط گوناگونی را برای محاسبه نقطه عطف منحنی نشست ارائه کرده اند که برخی از آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۳- معرفی متروی کرج، مشخصات فنی و ژئوتکنیکی

خط ۲ متروی کرج از کمال شهر شروع شده و پس از عبور از خیابان های 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 می یابد (شرکت مهندسی مشاور تونل راد ۱۳۹۰). لایه های شناسایی شده از خاک زیر سطحی محدوده مورد بررسی را می توان در سه گروه لایه های خاک دستی، خاک ریزدانه و خاک درشت دانه طبقه بندی کرد. مطالعه گمانه های حفاری شده در این محدوده نشان دهنده آن است که این رسوبات اغلب از خاک دانه درشت شن و ماسه تشکیل شده که با حرکت به سمت شرق ساختگاه و با دور شدن از قسمت های مرکزی مخروط افکنه کرج مصالح ریز دانه تر شده و از دیدگاه مکانیکی دارای مقاومت بالایی است (شرکت مهندسی مشاور دریا خاک پی ۱۳۸۴). در تصویر ۲ مسیر خط ۲ متروی کرج نشان داده شده است.

ضخامت خاک دستی در محدوده مورد مطالعه ۱ الی ۲ متر در ساختگاه مشاهده شده است. دانه بندی خاک دستی در نقاط مختلف از شن و ماسه (زیر خیابان ها) تارس (در فضای سبز) متغیر بوده است. در برخی مناطق شرقی ساختگاه خاک دستی دارای قطعات درشت قلوه سنگی نیز می باشد. در نواحی شرقی تا مرکزی نیز از لایه های خاک اغلب ریزدانه رسی، گاهی ماسه یا لایدار و به ندرت ماسه رسی و لایدار، مرطوب، بسیار سفت تا سخت و به رنگ قهوه ای تشکیل

شعاع تونل بیش از ۷۵ می باشد. همچنین زمین همگن و ایزوتروپ، رفتار زمین نیمه الاستیک و رفتار سیستم نگهداری الاستیک و الگوی تغییر شکل در اطراف تونل شعاعی می باشد (Bobet 2001).

این روش فاکتورهای زمانی مانند خزش مؤثر بر رفتار خاک را مد نظر قرار نمی دهد و در این شرایط (خاکی که رفتار وابسته به زمان دارد) قابلیت کاربرد ندارد. بابت میزان نشست زمین برای تونلسازی در زمین های خشک را نیز مورد بررسی قرار داد. مفروضات این حالت مشابه حالت اشباع است با این تفاوت که آب وجود ندارد. میزان ماکزیم نشست در شرایط زمین خشک از رابطه ۱ تعیین می شود.

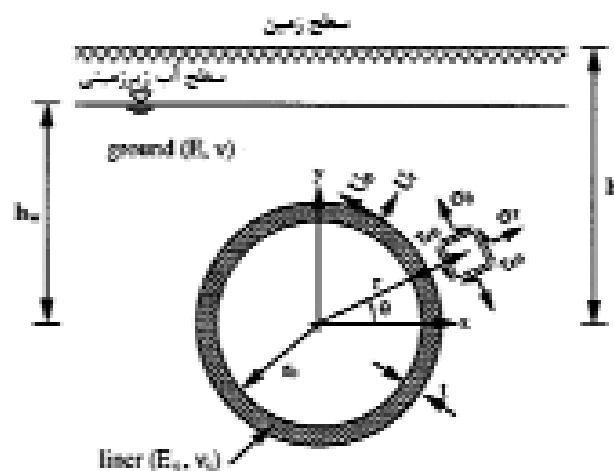
$$\delta_{max} = - \frac{wr_0}{h} + \frac{1+v}{E} \left[ \frac{1}{8} (K - \frac{v}{1-v}) \left( \frac{r_0}{h} \right)^2 - \frac{1}{4} \frac{3-4v}{1-v} \right. \\ \left. \ln h + \gamma h (1-K) r_0 + \frac{1}{8} \left( \frac{r_0}{h} \right)^3 - \frac{1}{4} \left( \frac{r_0}{h} \right)^5 \right]$$

در رابطه (۱) میزان پارامتر گپ، شعاع تونل، ضریب پواسون، مدول الاستیسیته خاک، وزن مخصوص کل خاک، عمق تونل و ضریب فشار زمین در حالت سکون (نسبت تنش افقی به قائم) است.

رابطه تحلیلی بابت میزان نشست ماکزیم را برآورد می کند. برای رسم پروفیل عرضی نشست از رابطه ۲ ارائه شده توسط پک در سال ۱۹۶۹ استفاده می شود (Peck 1969).

$$S = S_{max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

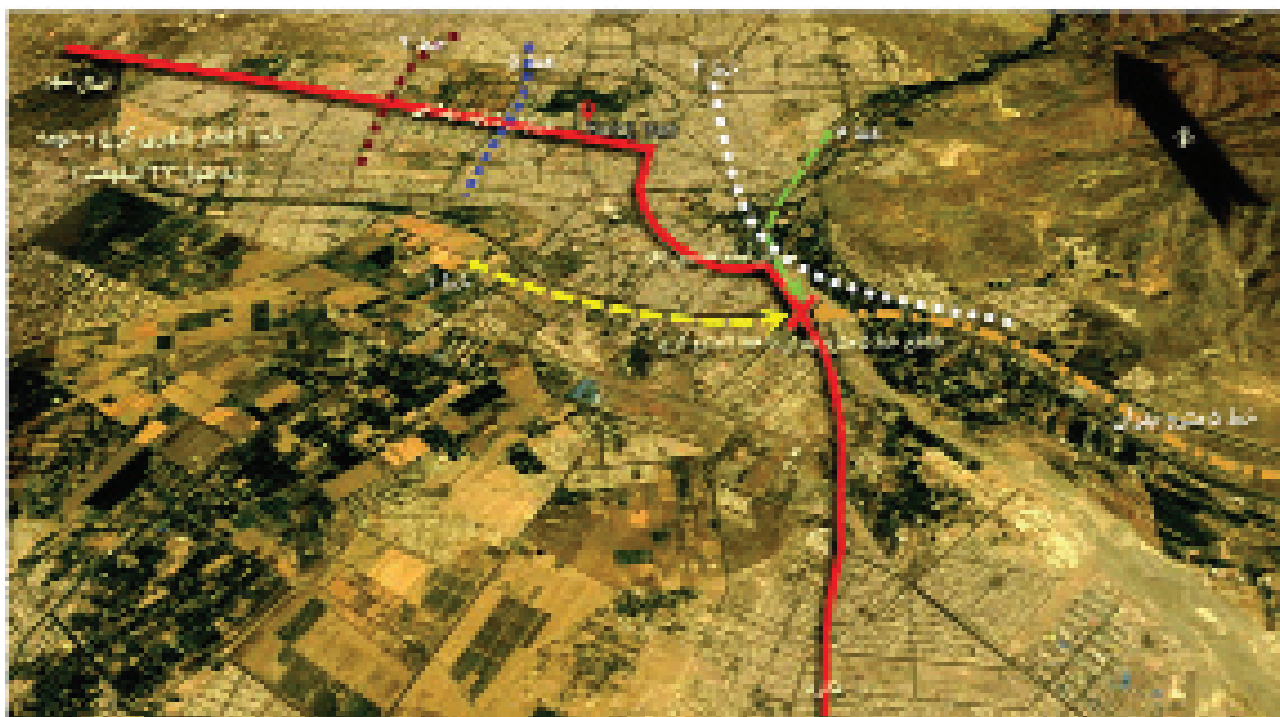
در رابطه (۲)، S میزان نشست در نقطه مد نظر،  $S = S_{max}$  نشست بیشینه، فاصله از محور تونل و نقطه عطف منحنی نشست است. در محل نقطه i، نشستی در حدود ۶۰٪ نشست بیشینه رخ می دهد



تصویر ۱- جزئیات مربوط به روش تحلیلی بابت (Bobet 2001)

جدول ۱- برخی روابط محاسبه مقدار به روش های تجربی (ستاری و همکاران ۱۳۸۸)

ارائه دهنده	رابطه
peck.1969	$\frac{i}{R} = \left( \frac{Z_0}{2R} \right)^n \quad n = 0.8 - 1$
Mail.1963	$i = 0.5Z_0$
Leach.1985	$i = 0.57 + 0.45(Z_0 - Z) \pm 1.01$ $i = 0.64 + 0.48Z \pm 0.91$
Arioglu,1992	$i = 0.386Z_0 + 2.84$ $i = 1.392R \left( \frac{Z_0}{D} \right)^{0.704}$
Lee,1999	$\frac{i}{R} = 0.58 \left( \frac{Z_0}{2R} \right) + 1.0$



تصویر ۲- نقشه مسیر خط ۲ متروی کرج (شرکت مهندسی مشاور تونل راد ۱۳۹۰)

شده است. ضخامت این لایه در نواحی مختلف بین صفر تا ۱۵ متر متغیر است. سازه تونل یک حلقه بیضی شکل از بتن مسلح به عرض ۸۴ متر و ارتفاع ۷/۸ متر است که در اعماق ۱۴ تا ۲۰ متری از سطح زمین واقع شده است. سیستم نگهداری موقت نیز شامل لیس، مش فولادی و شاتکریت به ضخامت ۳۵ سانتی متر می باشد (شرکت مهندسی مشاور تونل راد ۱۳۹۰). مشخصات ژئوتکنیکی مقطع مورد بررسی در جدول ۲ آمده است.

معادل ۸۴ متر در نظر گرفته شده و میزان شعاع در محاسبات ۴/۲ متر لحاظ شده است. تصویر ۳ میزان نشست برآورد شده به روش تحلیلی بابت را نشان می دهد.

در این روش، ماکزیم نشست سطح زمین ۳/۱ سانتی متر روی محور تونل برآورد شده است. تأثیر حفر تونل بر سطح زمین از ۳۰ متری اطراف تونل ناپدید شده و میزان نشست از این فاصله به بعد ناچیز و قابل صرف نظر کردن می باشد. لازم به ذکر است که ضریب فشار زمین در محاسبات بر اساس رابطه جکی ( $k = 1 - \sin \theta$ )،  $0/6$  لحاظ شده است (Brinkgreve 2002).

#### ۴- برآورد میزان نشست سطح زمین

##### ۴-۱- روش تحلیلی بابت

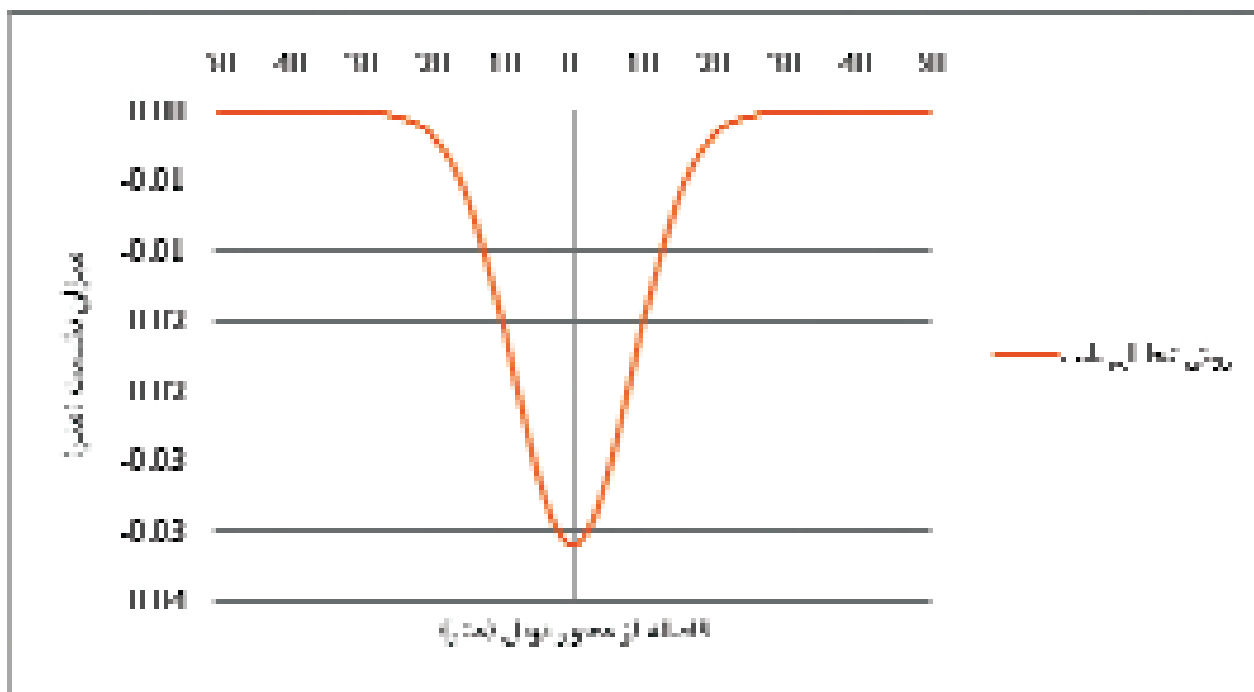
در این قسمت با توجه به مشخصات ارائه شده در جدول ۲، ابتدا به وسیله رابطه تحلیلی بابت (رابطه ۱)، میزان نشست ماکزیم برآورد گردید، سپس به وسیله رابطه تجربی پک (رابطه ۲)، پروفیل عرضی نشست رسم شد. برای محاسبه نقطه عطف منحنی نشست از روابط ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است. در این محاسبات، میزان پارامتر گپ ۱۰ سانتی متر و عمق تونل ۲۰ متر لحاظ شده است. قطر

جدول ۲- مشخصات ژئومکانیکی محدوده مورد مطالعه (شرکت مهندسی مشاور دریا خاک پی ۱۳۸۴)

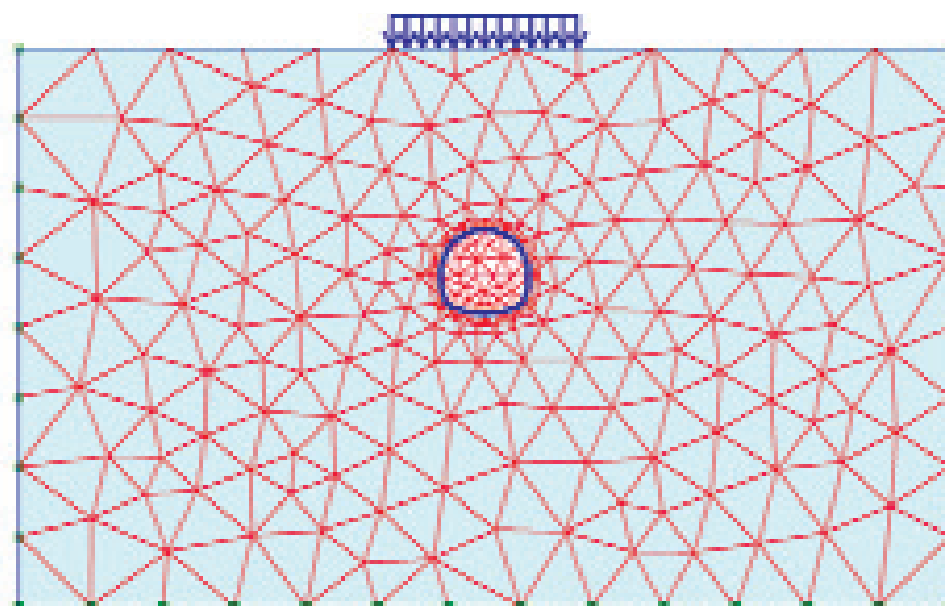
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (Kpa)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (Mpa)	$\gamma \left( \frac{\text{Tonne}}{m^3} \right)$
۲۰	۵۰	۰/۳	۴۰	۱/۸۶

۴-۲- روش عددی المان محدود در این قسمت از روش عددی المان محدود و از نرم افزار PLAXIS 2D 8.2 برای برآورد میزان نشست سطح زمین استفاده شده است. این نرم افزار محصول کشور هلند بوده و قابلیت بالایی در مدلسازی محیط های خاکی و سنگی دارد (Brinkgreve 2002).

در این تحلیل، مدلی با عرض (عمق) ۶۰ متر و طول ۱۰۰ متر (۵۰ تا ۵۰ متر) ساخته شده است. تأثیر حفر تونل در ۵۰ متر اطراف محور تونل روی سطح زمین مورد ارزیابی واقع شده است. مرزهای کناری مدل نسبت به جابجایی افقی و مرز پایینی مدل نسبت به جابجایی افقی و قائم ثابت شده است. همچنین مدل رفتاری موهر-کولمب به محیط



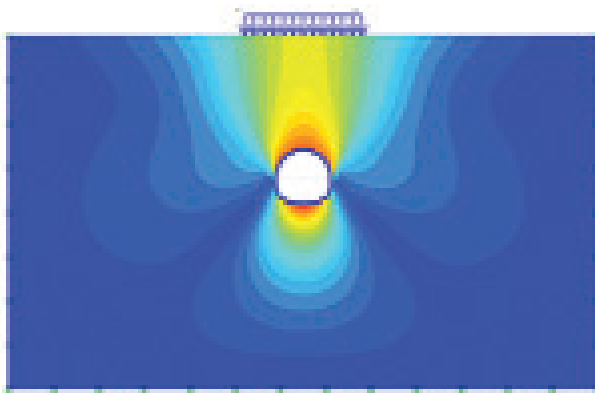
تصویر ۳- پروفیل عرضی نشست زمین، رابطه تحلیلی بابت



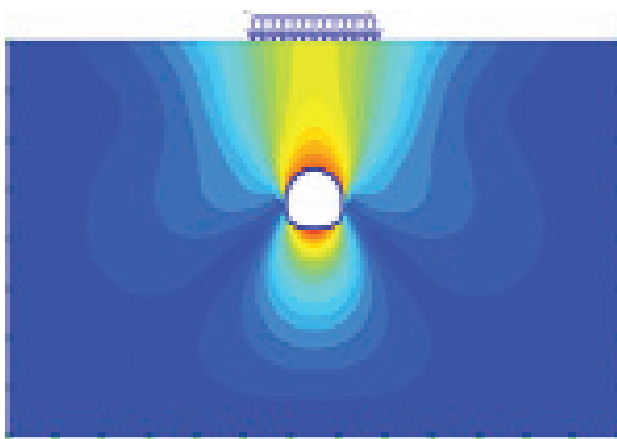
تصویر ۴- نحوه مش بندی، بار ترافیکی و مراحل حفر در روش عددی المان محدود

مرحله به مرحله می‌باشد. ابتدا مدل به تعادل رسیده و میزان جابجایی‌ها صفر شد در مرحله بعد بخش فوقانی حفاری شده و بتن پاشی بخش فوقانی اعمال شد، سپس بخش تحتانی حفاری شده و نگهداری کامل گردید. میزان نشست سطح زمین بعد از حفاری کامل مقطع در تصویر ۵ نمایش داده شده است. برای مدلسازی پوشش بتنی، از المان Plate استفاده شده است. جزئیات لحاظ شده برای مدلسازی پوشش بتنی اعمال شده به فضای حفاری تونل در جدول ۳ ارائه شده است.

خاکی مدل اعمال شده است. بارگذاری گسترده ۲ تن بر متر در قسمت فوقانی مدل به عنوان بار ترافیکی خیابان اعمال شده است. مدل از ۴۰۴ المان و ۳۳۸۱ گره تشکیل شده است. طبق روند حفاری در پروژه، تونل در دو بخش فوقانی و تحتانی مورد حفاری قرار گرفته است. تصویر ۴ نحوه مش بندی المان محدود، بار ترافیکی و مراحل حفاری در مدلسازی عددی را نشان می‌دهد. حفر تونل به صورت مرحله‌ای بوده و روند حل مدل نیز به صورت



تصویر ۶- کنتور جابجایی کل در اثر حفر تونل



تصویر ۷- کنتور جابجاییهای قائم

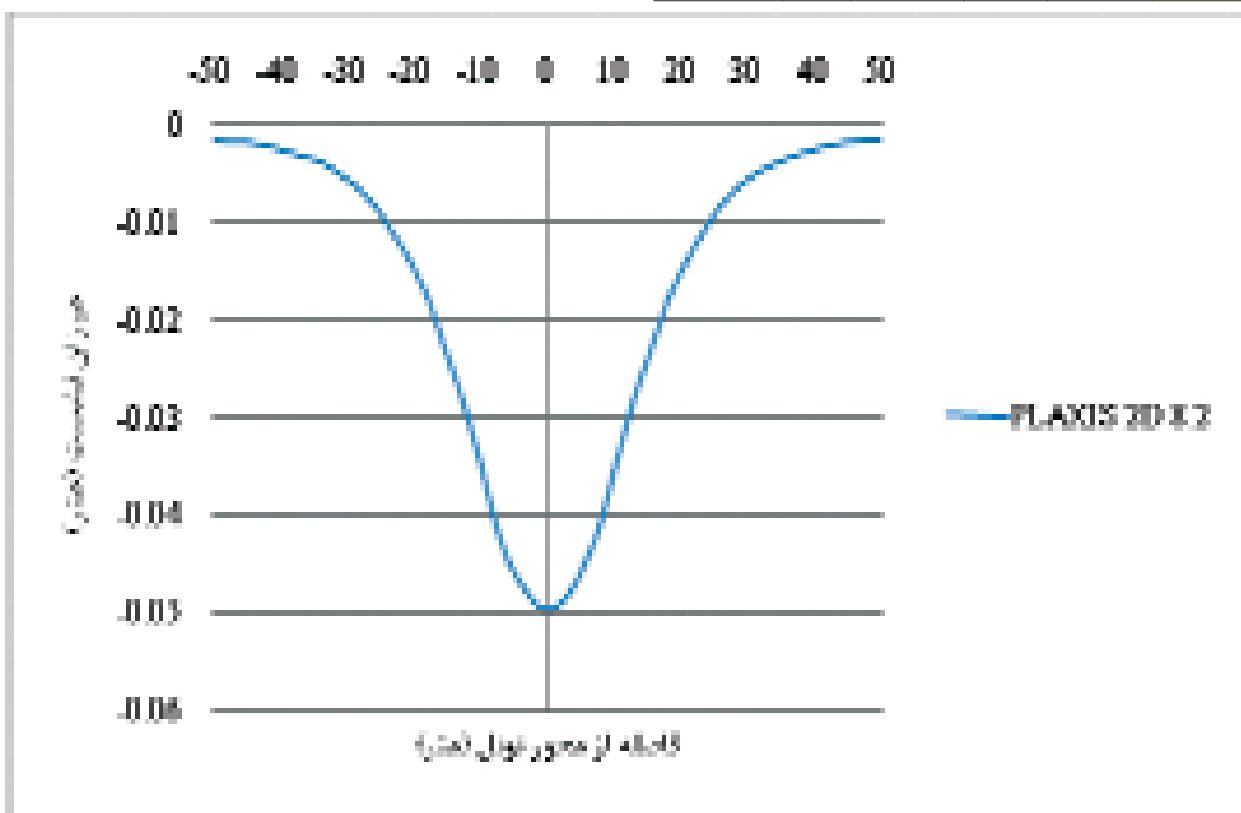
تصویرهای ۶ و ۷، کنتور جابجایی های کل و قائم بعد از حفاری کامل تونل را نشان می دهند. این تصاویر خروجی نرم افزار می باشند. مطابق تصویر ۷، جابجایی تاج تونل حدود ۷/۶ سانتی متر می باشد که این جابجایی در سطح زمین به حدود ۴/۹ سانتی متر می رسد. در نمودار ارائه شده در تصویر ۸ نیز میزان نشست برآوردی توسط رابطه تحلیلی بابت و روش عددی المان محدود به منظور مقایسه نشان داده شده است. بر این اساس، پهنای گودی نشست در رابطه تحلیلی بابت از پهنای گودی نشست در روش عددی المان محدود کمتر است. همچنین میزان نشست ماکزیمم برآورد شده در رابطه تحلیلی بابت ۳/۱ سانتی متر و در روش عددی المان محدود با اعمال بار ترافیکی ۴/۹ سانتی متر و بدون اعمال بار ترافیکی ۴ سانتی متر می باشد.

### ۵- نتایج ابزار دقیق پروژه

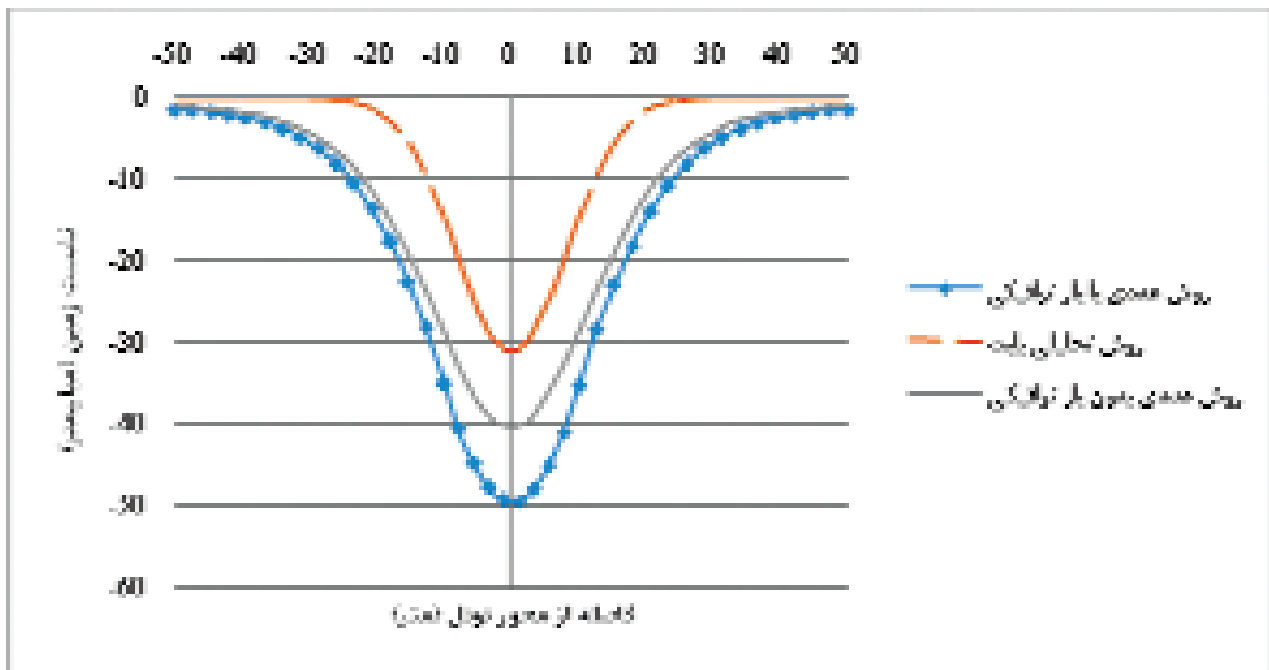
ایستگاه های نشست سنجی در خیابان و روی تونل به صورت پنج

جدول ۳- مشخصات پوشش بتنی استفاده شده در مدل سازی عددی

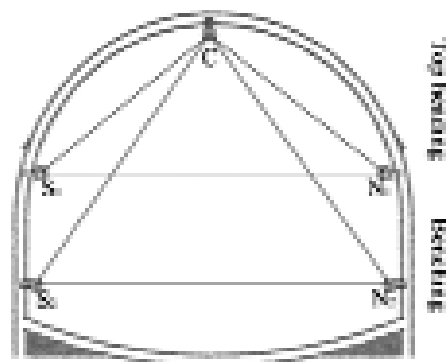
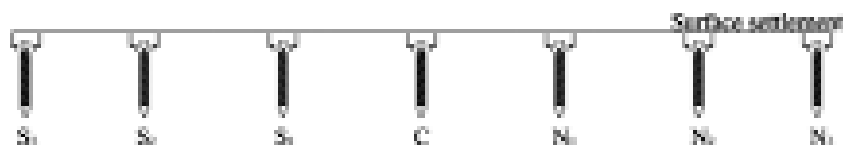
نوع المان	نسبت پواسون	وزن حجمی (KN/m <sup>3</sup> )	ضخامت (متر)	سختی خمشی (KNm <sup>2</sup> /m)	سختی محوری (KN/m)
الاستیک کامل	۰/۲	۷/۵	۰/۳۵	۷/۵*۱۰۴	۷/۳۵*۱۰۶



تصویر ۸- پروفیل عرضی نشست بعد از حفر کامل تونل، مدل سازی عددی (با اعمال بار ترافیکی)

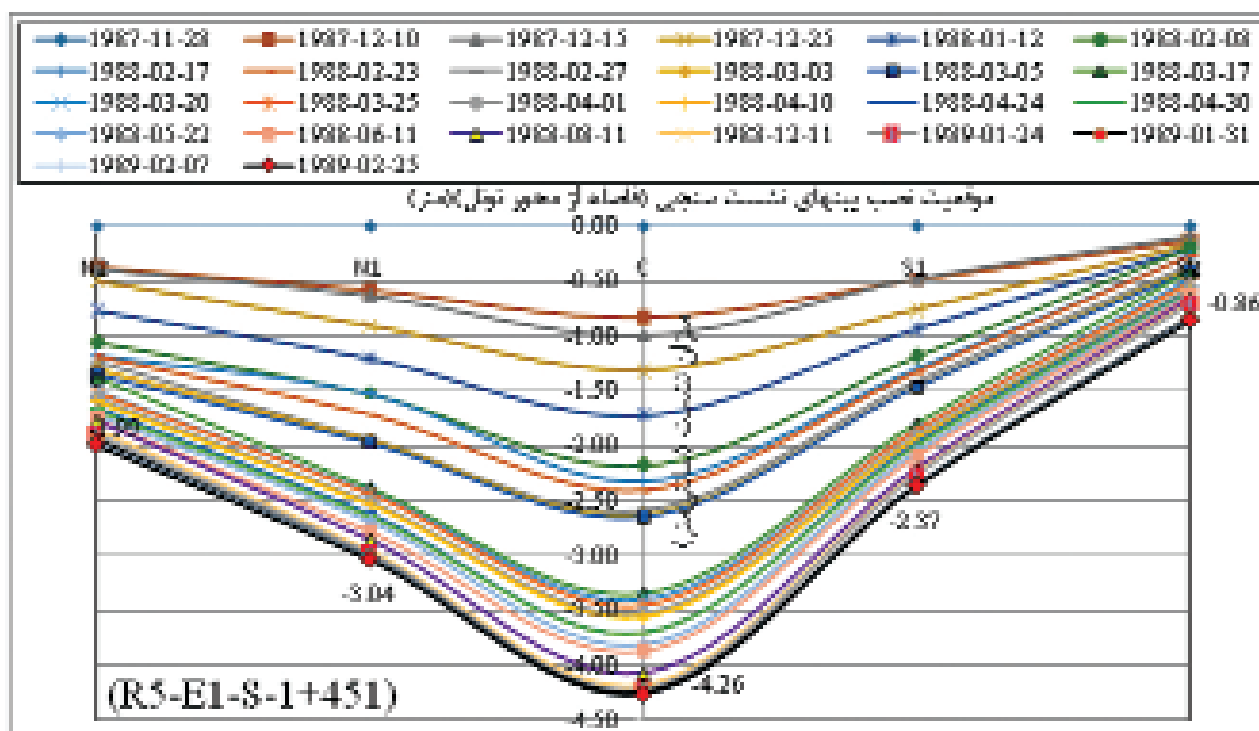


تصویر ۸- مقایسه رابطه تحلیلی بابت و روش عددی المان محدود



تصویر ۹- نحوه قرارگیری بین‌های نشست سنجی در سطح خیابان (شرکت مهندسی مشاور تونل راد ۱۳۹۰)

نقطه‌ای قرار می‌گیرند. بدین ترتیب که یک نقطه روی محور تونل و دو نقطه در فاصله ۷/۵ متری از محور تونل نصب می‌شوند. تصویر ۹ جزئیات مربوط به طرح ابزار دقیق را نشان می‌دهد (شرکت مهندسی مشاور تونل راد ۱۳۹۰). در این پژوهش 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. قرائت به وسیله یک دوربین با دقت مناسب (حدود ۰/۱ میلی‌متر) بصورت دوره‌ای انجام می‌گیرد. در صورت



تصویر ۱۰- میزان نشست های ثبت شده توسط ابزار دقیق (شرکت مهندسی مشاور تونل راد ۱۳۹۰)

تونل به صورت تمام مقطع حفاری می شود. همچنین در این رابطه امکان در نظر گرفتن مشخصات شاتکریت و بار ترافیکی خیابان وجود ندارد. در کل روابط تحلیلی نمی توانند جزئیات کاملی را از مسئله در نظر بگیرند و فقط میزان جابجایی ها و تغییر شکل ها را در محدوده خاصی لحاظ می کنند. اما در نقطه مقابل، روش های عددی و در این مورد خاص، نرم افزار PLAXIS 2D 8.2 به خوبی جزئیات مربوط به مسئله از قبیل مراحل حفاری تونل، بار ترافیکی خیابان و مشخصات شاتکریت را در نظر گرفته و تنش و تغییر شکل در هر محدوده از مسئله را مورد بررسی قرار می دهد. همچنین می توان گفت که این نرم افزار قادر است جزئیاتی نظیر وجود ساختمان، زیر گذر، پل و غیره را با دقت بالا در مدلسازی اعمال کرده و نتایج جامع تری را در اختیار قرار دهد. ذکر این نکته ضروری است که تحلیل عددی دو بعدی عموماً مقادیر را به صورت دسته بالا و محافظه کارانه بدست می دهد، لذا عموماً مقادیر جابجایی و تنش را بیشتر نشان می دهد. ولی با این حال میزان نشست برآورد شده به وسیله نرم افزار (۴/۹ سانتی متر بدون اعمال بار ترافیکی و ۴ سانتی متر با اعمال بار ترافیکی) به میزان نشست گزارش شده با ابزار دقیق (۴/۲ سانتی متر) نزدیک تر است. برای برآورد دقیق تر، بهتر است

مشاهده اختلاف تراز بین ها نسبت به یکدیگر، می توان به نشست یا بالازدگی لایه های خاک پی برد (شرکت مهندسی مشاور تونل راد ۱۳۹۰).

تصویر ۱۰ مربوط به میزان نشست سطحی از تاریخ ۸۷/۱۷/۲۸ تا تاریخ ۸۹/۰۲/۲۵ یعنی حدود ۱۵ ماه از آغاز حفاری می باشد. این مراحل شامل عملیات حفاری فوقانی، شاتکریت و نگهداری، حفاری تحتانی، نگهداری و عملیات لاینینگ (که تا به تعادل رسیدن تنش های اطراف فضای حفاری و ثابت شدن نشست سطحی ادامه یافته)، می باشد. مطابق تصویر ۱۰، حداکثر میزان نشست ۴/۲ سانتی متر می باشد.

در این تحقیق رابطه تحلیلی بابت و نرم افزار Plaxis، مورد مقایسه قرار گرفتند. میزان نشست برآورد شده به وسیله رابطه تحلیلی بابت ۳/۱ سانتی متر و میزان نشست برآورد شده به روش عددی المان محدود ۴/۹ سانتی متر می باشد. همچنین میزان نشست ثبت شده با ابزار دقیق، ۴/۲ سانتی متر می باشد. رابطه تحلیلی بابت با در نظر گرفتن پارامترهایی از قبیل مدول الاستیسیته، شعاع تونل، عمق تونل و ضریب فشار زمین سعی به برآورد میزان نشست دارد. اما ذکر این نکات ضروری است که در رابطه تحلیلی بابت فرض بر آن است که



Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Volume, Mexico City, Mexico, Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos: 225-290.

**Potts, D. M., Addenbrooke, T. I., 1997.** A structure influence on tunneling induced ground movement. *Proceeding of the institution of Civil Engineers, paper 11048*: 109-125.

**Sagaseta, C., 1987.** Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. *Geotechnique* 37 (3): 301-320.

**Talebinejad, A., Chakeri, H., Moosavi, M., Ozcelik, Y., Unver, B., Hindistan, M. A., 2013.** Investigation of surface and subsurface displacements due to multiple tunnels excavation in urban area. *Arabian Journal of Geosciences*, DOI 10.1007/s12517-013-1056-5.

**Verruijt, A., Booker, J. R., 1996.** Surface settlement due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. *Geotechnique* 46 (4): 753-756.

مجموعه ای از روش های تحلیلی و عددی بررسی و با یکدیگر مقایسه شده و در نهایت با قضاوت مهندسی به نتیجه مطلوب رسید.

## مراجع

ستاری، ق، اسدی، ا، شهریار، ک، زمانی، ح، ۱۳۸۸. برآورد عددی و تحلیلی نشست سطح زمین ناشی از تونل سازی با سپر تعادلی، مطالعه موردی؛ خط هفت متروی تهران. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران: ۱۲۳-۱۲۹.

شرکت مهندسی مشاور تونل راد، ۱۳۹۰. گزارش رفتارنگاری پروژه قطار شهری کرج و حومه.

شرکت مهندسی مشاور دریا خاک پی، ۱۳۸۴. گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک قطعه دوم مسیر مصوب قطار شهری کرج و حومه.

**Attewell, P. B., Woodman, J. P., 1982.** Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil. *Ground Engineering* 15 (8): 13-20.

**Bobet, A., 2001.** Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground. *J.Eng. Mech. Div. ASCE* 127 (12): 1258-1266.

**Brinkgreve, R.B.J., 2002.** PLAXIS 2D version 8.2 reference manual. *Delft University of Technology, Netherlands.*

**Dimmock P. S., Mair R. J., 2008.** Effect of building stiffness on tunneling-induced ground movement. *Journal of Tunneling & Underground Space Technology* 23: 438-450.

**Franzius J. N., 2003.** Behavior of building due to tunnel induced settlement. Ph.D. thesis, Imperial College of Science, *Technology and Medicine.*

**Gonzalez, C., Sagaseta, C., 2001.** Patterns of soil deformations around tunnels, application to the extension of Madrid Metro. *Computers and Geotechnics*, 28: 445-468.

**Ghorbani, M., Sharifzadeh, M., Yasrobi, S., Daiyan, M., 2012.** Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunneling hazards in urban areas - the case of niayesh road tunnel project. *Tunneling and Underground Space Technology* 31: 1-8.

**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.

**Mirhabibi, A., Soroush, A., 2012.** Effect of surface buildings on twin tunneling-induced ground settlement. *Tunneling and Underground Space Technology* 29: 40-51.

**Mirhabibi, A., Soroush, A., 2013.** Effects of building three-dimensional modeling type on twin tunneling-induced ground settlement. *Tunneling and Underground Space Technology* 38: 224-234.

**Park, K. H., 2005.** Analytical solution for tunneling-induced ground movement in clays. *Tunneling and Underground Space Technology* 20: 249-261.

**Peck, R. B., 1969.** Deep excavations and tunneling in soft ground. In: *Proceedings of the 7th International*