

## یادداشت پژوهشی

# پیش بینی نشست سطح زمین تحت تأثیر تونل سازی مکانیزه در محدوده ایستگاه‌های شماره ۱۱ و ۱۲ خط یک متروی تبریز، به روشهای تجربی، تحلیلی و عددی

حامد کریم نیا (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

حسین میرزائی نصیرآباد، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

شکرالله زارع، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

Email:hamedkarimnia@yahoo.com

پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۰

دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱

### چکیده:

امروزه در شهرهای بزرگ، متروها و تونل‌های شهری یکی از کلیدی ترین و مهم ترین زیرساختهای شبکه حمل و نقل شهری به شمار می‌آیند. با توجه به اینکه پروژه‌های جدید تونل باید در زیر مناطق پر جمعیت شهری ساخته شوند، ساخت و اجرای این سیستم‌های زیرزمینی ممکن است عوارضی را برای تاسیسات و آسیب به سازه‌های سطحی و زیر سطحی در پی داشته باشد. در این مقاله به دلیل اهمیت موضوع عبور از بافت فرسوده شهری و تا حد امکان تقلیل خسارات وارده، محدوده مابین ایستگاه‌های شماره ۱۱ و ۱۲ خط یک قطار شهری تبریز که دارای بافت فرسوده و سنتی بوده و شامل ساختمان‌ها و سازه‌هایی با قدمت زیاد و عدم استحکام کافی است، مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است. با توجه به وجود ساختمان‌های میراث فرهنگی در یک مقطع از مسیر، بررسی نشستها در این مقطع با استفاده از روش تجربی پک، روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس و روش عددی المان محدود (نرم افزار PIAXIS3D Tunnel) صورت گرفته است. در انتها نیز نتایج حاصل از هر سه روش با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر نشست سطح زمین حاصل از مدل عددی به دلیل در نظر گرفتن بار سازه‌های سطحی بیشتر از مقدار نشست به دست آمده از روشهای تجربی و تحلیلی است و همچنین با توجه به اینکه نتایج نشست سطح زمین حاصل از مدل عددی بیشتر از مقدار مجاز نشست در مناطق شهری و مسکونی است، نیاز است که در این مقطع از محدوده مورد مطالعه فرایندهای کنترلی نشست به منظور عبور ایمن دستگاه حفاری صورت بگیرد.

واژه‌های کلیدی: نشست سطح زمین، روش تجربی پک، روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس، نرم افزار PIAXIS3D Tunnel، تونل‌سازی

## ۱. مقدمه

حرکات زمین نتیجه اجتناب ناپذیر حفاری و ساخت فضای زیرزمینی است. حفاری تونل باعث برهم خوردن تنش‌های برجا در زمین می‌شود که فقط با نصب سیستم نگهداری در تونل میتوان آنرا محدود کرد. در حقیقت ساخت همزمان یک حفره و ایجاد یک سیستم نگهداری صلب که کاملاً بر تونل منطبق باشد، امکان‌پذیر نیست. از این رو مقدار مشخصی تغییر شکل زمین در عمق تونل اتفاق خواهد افتاد. این موضوع زنجیره‌ای از حرکات را به راه خواهد انداخت که تا سطح زمین گسترش می‌یابد و با کاهش عمق تونل این نشستها به طور چشمگیری افزایش می‌یابند [Vittorio, et al. 2007]. از اینرو پیشبینی دقیق نشست‌های بوجود آمده در مناطق شهری و بخصوص هنگام عبور از زیر مناطق مسکونی اهمیت زیادی دارد. روش‌های پیش‌بینی نشست به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی. از جمله روش‌های تجربی و تحلیلی به منظور تخمین نشست ناشی از تونل‌سازی میتوان به موارد زیر اشاره کرد: برای اولین بار پک (۱۹۶۹) بر اساس داده‌های موجود از تعداد زیادی پروژه‌های تونل‌سازی، عنوان کرد که گودی نشست بالای تونل را میتوان با دقت قابل قبولی به وسیله تابع خطا یا منحنی احتمال نرمال (معروف به منحنی گوس) بیان کرد که منجر به ارایه یک رابطه تجربی شد [Franzius, 2003]. ساگاستا (۱۹۸۷) یکی از اولین روابط تحلیلی برای بررسی نشست را ارایه کرد. این محقق در روابط خود با استفاده از یک راه حل فرم بسته، میدان کرنش در یک محیط همگن، ایزوتروپ و تراکم ناپذیر را به دست آورد [Migliaza, Chiorboli and Giani, 2009].

ورویجیت و بوکر (۱۹۹۶) برخلاف رابطه ساگاستا، جابجایی قائم و افقی سطح مقطع تونل در اعماق مختلف و سطح زمین را برای محیط تراکم پذیر و با ضریب پواسون‌های متفاوت ارایه کرد. این محقق دو مدل تغییر شکل تونل به نام انقباض شعاعی و

تغییر شکل بیضوی را در روابط خود در نظر گرفت [Chou and Babet, 2002]. پارک (۲۰۰۴) روش الاستیک ورویجیت و بوکر را تغییر داده و تغییر شکل در اثر حفاری تونل در زمینهای رسی را با در نظر گرفتن ۴ الگوی تغییر شکل مختلف در دهانه حفریه ارایه کرد [Park, 2004]. تحلیلهای عددی از روشهای پرکاربرد هستند که امکان بررسی مراحل ساخت، رفتار سه بعدی جبهه‌کار و همچنین برهم‌کنش بین تونل و پوشش بتنی را فراهم می‌سازند. اوچاک (۲۰۰۹) نشست‌های کوتاه مدت سطح و تاثیرات آنها بر روی ساختمان‌ها را برای تونل‌های دوقلوی متروی استانبول با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی کرد [Ocak, 2009]. محمود اوغلو (۲۰۱۱) با استفاده از روش اجزای محدود فاکتورهای مختلفی را بر روی نشست تونل‌های دوقلوی مترو استانبول که با استفاده از دستگاه EPB حفاری می‌شوند، مورد بررسی قرار داد [Mahmutoglu, 2011]. چن و همکاران (۲۰۱۱) فشار آب، نشست‌های سطح زمین و زیر سطح زمین و جابجایی‌های افقی در طول ساخت تونل‌های موازی دوقلوی مترو Hangzhou در چین را مورد مطالعه قرار دادند [Chen, et al. 2011]. لیو و لامبروگی و همکاران (۲۰۱۲) با اطلاعات پروژه مترو شهر مادرید اسپانیا و با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و مدل‌سازی سه بعدی با استفاده از نرم افزار FLAC3D با آنالیز حساسیت مدل‌های رفتاری مختلف خاک به بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین پرداخته و پروفیل‌های طولی نشست را در حالت‌های مختلف به دست آورده اند [Lambrugh, Medina and Castellanza, 2012].

در تحقیق حاضر به دلیل اهمیت موضوع عبور از بافت فرسوده شهری و تا حد امکان، تقلیل خسارات وارده، محدوده ما بین ایستگاه‌های شماره ۱۱ و ۱۲ خط یک قطار شهری تبریز که دارای بافت فرسوده و سستی بوده و شامل ساختمان‌ها و سازه‌هایی با قدمت زیاد و عدم استحکام کافی است مورد مطالعه و تحقیق

## پیش بینی نشست سطح زمین تحت تأثیر تونل سازی مکانیزه...

متروی تبریز و همچنین شمای کلی مسیرهای ۴ گانه قطار شهری تبریز و محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد [Tabriz Metro Company, 2007].

خط یک قطار شهری تبریز با طول ۱۷/۲ کیلومتر بخش جنوب شرقی شهر را به بخش جنوب غربی متصل می‌کند. از لحاظ فیزیکی به صورت همسطح، نیمه عمیق، عمیق و در ارتفاع طراحی شده است. در بخش عمیق به صورت دو تونل تک خطی (دوقلو) است که عملیات حفاری تونل‌ها با استفاده از دو دستگاه TBM-EPB انجام می‌پذیرد. قطر حفاری تونل‌ها ۶/۸۸ متر و قطر خارجی سگمنت‌ها ۶/۶ متر و قطر داخلی تونل‌ها ۶ متر است که دارای ۱۴ سانتیمتر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌هاست که به وسیله بتن تزریقی پرمی‌شود. مقطعی از مسیر تونل‌ها که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، محدوده ایستگاه ۱۱ و ۱۲ است که دارای بافت فرسوده و سازه‌هایی با قدمت زیاد است. به طور کلی شهر تبریز بر روی رسوبات دوره‌های مختلف دوران‌های سوم و چهارم زمین شناسی بنا شده است. این رسوبات شامل سنگ رس، ماسه سنگ، کنگلومرا، توف، توفیت، ژپس و رسوبات آبرفتی از قبیل رس، لای، ماسه، شن و قلوه سنگ با دانه‌بندی مختلف می‌باشند. در راستای مطالعات ژئوتکنیکی مسیر خط یک قطار شهری تبریز، تعداد ۵ حلقه گمانه ماشینی به وسیله دستگاه حفاری دورانی در حد فاصل ایستگاه ۱۱ و ۱۲ به عمق حداکثر ۴۰ متر با مشخصات MBH8، MBH9، MBH10،

قرار گرفته است. به همین منظور، نتایج نشست سطح زمین این محدوده از خط یک متروی تبریز در مقطع مورد مطالعه با استفاده از روش تجربی پک، روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس و روش عددی (روش المان محدود، نرم‌افزار PIAXIS<sup>3D</sup> Tunnel) محاسبه و اثر آن بر سازه‌های سطحی بررسی شده است. در نتیجه این تحقیق نتایج حاصل از هر سه روش با یکدیگر مقایسه شده و ساختمان‌هایی که قبل از عبور دستگاه حفاری نیاز به اقدامات کنترلی نشست دارند شناسایی شدند.

## ۲. معرفی پروژه خط یک متروی تبریز

مورد مطالعاتی در این تحقیق در شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی و در شمال غرب کشور ایران قرار دارد. ۱/۲۸ میلیون نفر در این شهر زندگی میکنند و روزانه ۱/۸ میلیون سفر درون شهری در تبریز انجام می‌گیرد. طبق پیشبینی‌ها، جمعیت تبریز در سال ۱۴۰۰ هجری شمسی نزدیک به ۲ میلیون نفر خواهد بود و میزان ۴/۵ میلیون سفر درون شهری در تبریز صورت خواهد گرفت. لذا با توجه به حجم وسیع مسافرت‌های درون شهری و ضرورت استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی جهت کاهش مشکلات ترافیکی شهر، در سال ۱۳۸۰ مطالعه و طراحی خط یک آغاز گردید. شبکه قطار شهری تبریز شامل ۴ مسیر جمعا به طول ۶۰ کیلومتر و ۶۰ ایستگاه طراحی شده است. شکل (۱) عکس هوایی مسیر تونل‌های دوقلوی محدوده ایستگاه‌های ۱۱ و ۱۲



شکل ۱. عکس هوایی مسیر مورد مطالعه خط یک و طرح خطوط متروی تبریز و محدوده مورد مطالعه [Tabriz Metro Company, ۲۰۰۷]

پارامتر تعریف شده توسط لی و همکارانش (۱۹۹۲) استفاده کردند. بطور کلی افت زمین معادل ( $\epsilon_0$ ) به صورت رابطه زیر

$$\epsilon_0 = \frac{\pi \left( a_0 + \frac{g}{2} \right) - \pi a_0^2}{\pi a_0^2} 100\% = \frac{g a_0 + g^2}{4 a_0^2} 100\% \quad (1)$$

در این رابطه:

$a_0$  شعاع تونل و  $g$  پارامتر گپ است که توسط لی و همکارانش

در سال ۱۹۹۲ به صورت زیر تعریف شده است:

$$g = G_p + U_{3D} + \omega \quad (2)$$

در این رابطه مطابق شکل (۳)،  $G_p$  یک فاصله (گپ) فیزیکی

است که بیانگر فضای خالی بین سپر و سیستم نگهداری است.

پارامتر  $U_{3D}$  تغییر شکل الاستو پلاستیک سه بعدی در جبهه کار

تونل است و پارامتر  $\omega$  کیفیت مهارت عوامل اجرایی را در نظر

می‌گیرد.

FBH14 و FBH15 حفر گردیده است که در شکل (۲) موقعیت

و محل این گمانه‌ها نسبت به راستای تونل‌ها نشان داده شده

است. نوع جنس خاک و پارامترهای ژئوتکنیکی گمانه حفر شده

مربوط به مقطع مورد مطالعه در جدول (۱) ارایه شده است.

ارتفاع روباره تونل در این مقطع ۱۵/۸ متر و سطح آب زیرزمینی

در عمق ۹/۴ متر سطح زمین قرار دارد. همچنین برای تعیین نسبت

تنش‌های افقی برجا به تنش قائم برجا ( $K_0$ ) روابط مختلفی ارایه

شده است. با توجه به اینکه خاک مسیر پروژه عمدتاً دانه‌های

است از معادله ( $K_0 = 1 - \sin \phi$ ) برای محاسبه  $K_0$  استفاده

شده است.

### ۳. روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس

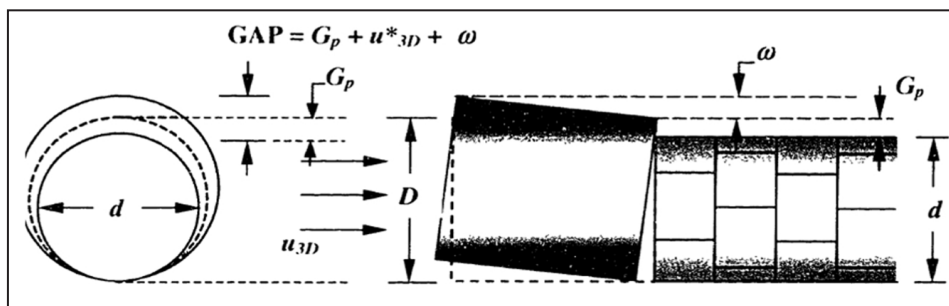
لاگاناتان و پولوس در سال ۱۹۹۸ برای تخمین افت زمین از



شکل ۲. موقعیت گمانه‌های محدوده ایستگاه ۱۱ و ۱۲ همراه با موقعیت تونل‌ها و ساختمان‌های مورد بررسی

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های گمانه MBH10 خط یک متروی تبریز [Tabriz Metro Company, 2007]

عمق (متر)	نوع خاک	وزن مخصوص خشک ( $kN/m^3$ )	وزن مخصوص غوطه‌ور ( $kN/m^3$ )	زاویه اصطکاک داخلی ( $^\circ$ )	چسبندگی ( $kN/m^2$ )	مدول الاستیسیته ( $kN/m^2$ )	ضریب پواسون
۰-۱۵	clay	۱۶	۲۰	۲۱	۲۵	۱۰۰۰۰	۰/۲
۱۵-۳۱	sand	۱۸	۲۱	۳۲	۰	۲۰۰۰۰	۰/۲
۳۱-۴۰	clay	۱۳	۱۸	۲۰	۲۰	۱۰۰۰۰	۰/۲



شکل ۳. پیشروی تونل تحت تاثیر تمام مولفه های افت زمین شامل بیش حفاری، کجی کله حفار و مهارت کم اپراتور [Babet, 2001]

اجرائی در حین حفاری تونل تا زمان رسیدن تونل به مقطع مورد نظر، مشکل افت زمین با توجه به این پارامتر دیگر وجود نخواهد داشت و در نتیجه  $\omega$  قابل صرف نظر کردن خواهد بود، از این رو گپ معادل گپ فیزیکی در نظر گرفته می‌شود:

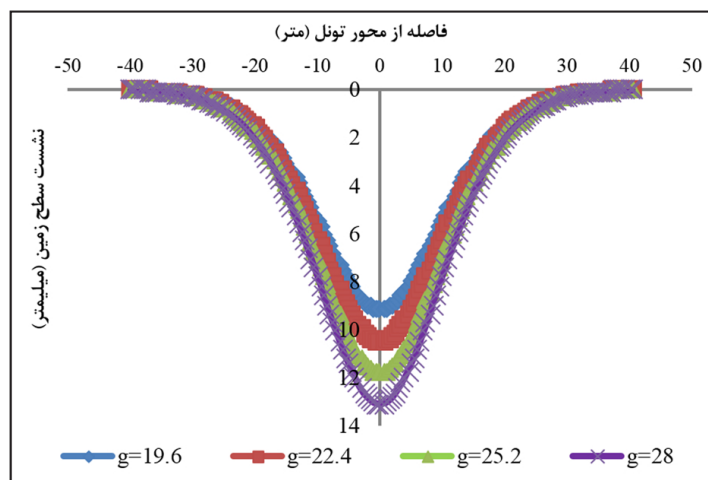
$$g = G_p + U_{3D} + \omega = 280 + 0 + 0 = 280 \text{ mm}$$

طبق تحقیقات اینگلس بر روی نمونه های تزریقی با انجام عملیات تزریق این فاصله به  $0.1-0.07$  میزان اولیه آن کاهش خواهد یافت، که این مقدار ضریب تصحیح نامیده می‌شود. با در نظر گرفتن ضرایب مختلف تصحیح تزریق، منحنی نشست سطح زمین در این مقطع رسم شده است. پروفیل‌های عرضی نشست سطح زمین در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین نتایج نشست سطح زمین به ازای مقادیر مختلف ضریب تصحیح تزریق در جدول (۲) ارائه شده است.

روابطی که این محققین ارائه کردند مربوط به نشست کوتاه مدت یعنی شرایط زه کش نشده است. پس تغییر شکل زمین در نتیجه حرکت بیضوی سیستم نگهداری در دراز مدت در نظر گرفته نمی‌شود.

### ۱-۳ پیش‌بینی نشست سطح زمین با استفاده از روش لاگاناتان و پولوس

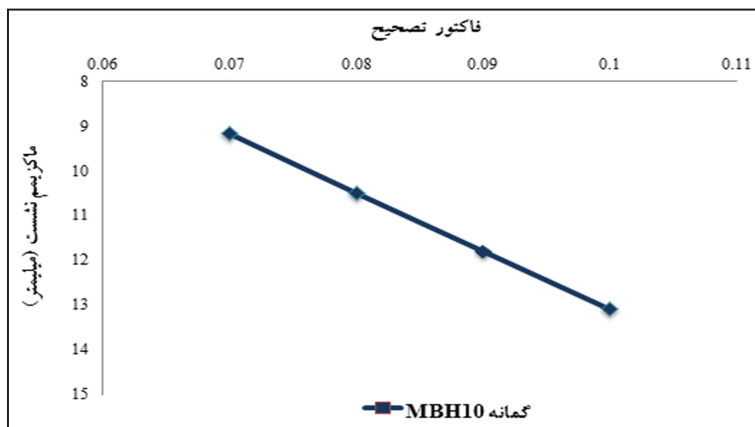
از آنجایی که قطر حفاری تونل در خط یک مترو تبریز  $6/88$  متر و قطر خارجی آستر کاری (سگمنت گذاری)  $6/60$  متر است، بنابراین اندازه  $G_p$  برابر  $280$  میلیمتر خواهد بود. طبق اظهارات لی و همکارانش با کاربرد فنون مناسب ساخت (نظیر استفاده از سپر فشار تعادلی زمین)، حرکت سه بعدی جلوی سینه کار می‌تواند کنترل شود، به عبارت دیگر اگر هیچ آزادی فشار در سینه‌کار وجود نداشته باشد، میزان این پارامتر صفر خواهد شد، پس  $U_{3D} = 0$ . در ضمن با فرض دستیابی به مهارت کافی عوامل



شکل ۴. پروفیل عرضی نشست سطح زمین با استفاده از روش لاگاناتان و پولوس

جدول ۲. نتایج نشست سطح زمین با روش لاگاناتان و پولوس

عمق تونل (متر)	فاکتور تصحیح	اندازه گپ (میلی متر)	$S_{max}(mm)$
۱۹/۲۴	۰/۰۷	۱۹/۶	۹/۱۷
۱۹/۲۴	۰/۰۸	۲۲/۴	۱۰/۵
۱۹/۲۴	۰/۰۹	۲۵/۲	۱۱/۸
۱۹/۲۴	۰/۱	۲۸	۱۳/۱
۱۹/۲۴	۱	۲۸۰	۱۲۲



شکل ۵. نشست بیشینه نسبت به فاکتور تصحیح

این محقق بیان کرد که گودی نشست بالای تونل را می توان با دقت قابل قبولی به وسیله تابع خطا یا منحنی احتمال نرمال (معروف به منحنی گوس) بیان کرد. بطور کلی در رابطه ارایه شده توسط پک دو پارامتر اصلی مقدار نشست بیشینه ( $S_{max}$ ) و پهنای

گودی نشست ( $i$ ) نقش اصلی را دارند. [Franzius, 2003]

$$S_{v(x)} = S_{v,max} \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad \text{در رابطه (۳):}$$

$S_v$ : مقدار نشست سطح در مقطع عرضی تونل،  $S_{v,max}$ : نشست حداکثر،  $y$ : فاصله از محور تونل،  $i$ : مختصات نقطه عطف منحنی است. گودی نشست در نقطه عطف منحنی دارای بیشترین شیب است که در فاصله  $i$  از مرکز تونل قرار دارد.

حجم گودی نشست بر اساس مقدار نشست حداکثر طبق رابطه

در شکل (۵) تاثیر تحلیل پارامتری ضریب تصحیح تزریق نسبه به نشست بیشینه سطح زمین در محل گمانه MBH10 نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش فاکتور تصحیح و افزایش اندازه گپ، بیشینه نشست افزایش می یابد.

همانطور که مشاهده می شود، میزان نشست بیشینه با افزایش ضریب تصحیح افزایش پیدا میکند و به ازای  $21g$ ،  $24g$ ،  $27g$  و  $30g$  به ترتیب برابر  $9/17$ ،  $10/5$ ،  $11/8$  و  $13/1$  میلیمتر محاسبه شده است. همچنین به ازای اندازه گپ  $280$  میلیمتر یعنی زمانی که تزریق صورت نمی گیرد بیشترین نشست اتفاق می افتد که این مسئله اهمیت انجام عملیات تزریق را نشان می دهد.

#### ۴. روش تجربی پک

بر اساس داده های موجود از تعداد زیادی پروژه های تونل سازی،

## پیش بینی نشست سطح زمین تحت تأثیر تونل سازی مکانیزه...

پهنای گودی نشست (i) نقش اصلی را دارد، به همین دلیل منحنی نشست عرضی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه به ازای مقادیر مختلف پهنای گودی نشست (با توجه به روابط جدول (۳)) و افت حجم ۰/۸۸٪ در شکل (۶) رسم شده است. با توجه به پروفیل نشست، برای یک مقدار ثابت افت حجم، با افزایش پارامتر (i) از ۵/۶۷ تا ۹/۶۲ میزان نشست بیشینه از ۲۱/۰۴ تا ۱۲/۴ میلیمتر و به اندازه ۸/۶۴ میلیمتر کاهش پیدا کرده است.

### ۵. مدلسازی عددی نشست سطح زمین با استفاده از نرم افزار PIAXIS3D Tunnel

به منظور بررسی نشست سطح زمین با استفاده از روش عددی، در این تحقیق از نرم افزار المان محدود PIAXIS3D tunnel برای تحلیل نشست مقطع مورد مطالعه استفاده شده است.

(۴) به دست می آید:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v dx = \sqrt{2\pi i} S_{v, \max}$$

در این رابطه:

$V_s$ ، حجم گودی نشست در واحد طول پیشروی تونل است، که تعاریف متفاوتی برای آن در نظر گرفته شده است. در اصل حجم گودی نشست سطح برابر با حجم خاک اضافه حفر شده نسبت به حجم تئوریک تونل است. معمولاً این حجم اضافی به صورت کسری از حجم تئوریک تونل تعریف می شود. در نهایت رابطه نشست به صورت رابطه (۵) تعریف می شود.

$$S_{v(y)} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{V_L D^2}{4i} e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (5)$$

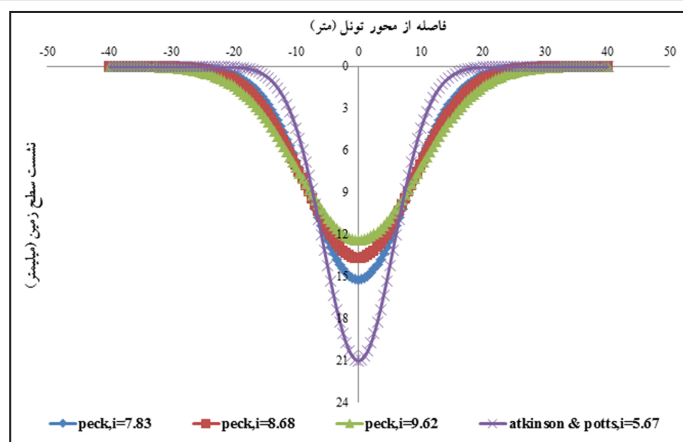
در جدول (۳) میتوان مقادیر مختلف پارامتر گودی نشست (i) ارایه شده توسط محققین مختلف را مشاهده نمود.

### ۴-۱ پیش بینی نشست سطح زمین با استفاده از روش پک

با توجه به اینکه در رابطه ارایه شده توسط آقای پک، پارامتر

جدول ۳. روابط تجربی برای تخمین مقدار پارامتر گودی نشست [Sweeny, 2006]

ماخذ	مقدار (i)	اساس رابطه تجربی
Peck	$i/R = (z_0/2R)^n$ n=0.8-1	مشاهدات محلی
Attewell&Farmer	$i/R = (z_0/2R)$	مشاهدات محلی در تونل های انگلستان
Schmidt&Clough	$i/R = (z_0/2R)^{0.8}$	مشاهدات محلی در تونل های انگلستان
Reilly O & New	$i=0.43z_0 + 1.1$ ( $3 \leq z_0 \leq 34$ ) $i=0.28z_0 - 0.1$ خاک های غیر چسبیده ( $6 \leq z_0 \leq 10$ )	مشاهدات محلی در تونل های انگلستان
Atkinson & potts	$i=0.25(Z_0 + R)$ ماسه های سست $i=0.25(1.5Z_0 + 0.5R)$ رس	مشاهدات محلی و تست های آزمایشگاهی
Leach	$i = (0.45z_0 + 0.57) \pm 1.01$	جاهایی که اثر تحکیم قابل توجه نیستند



شکل ۶. پروفیل عرضی نشست سطح زمین با استفاده از روش پک

ساخته شده است). همچنین در جدول (۴) نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داده شده است.

بر اساس این تحلیل حساسیت، طول، عرض و ارتفاع مدل ساخته شده به ترتیب برابر ۱۱۴، ۸۲ و ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی این‌گونه انجام شده که جابجایی مرزهای کناری در جهت قائم (Y) آزاد بوده و در جهت افقی (X) ثابت می‌شوند و مرز پائین نیز در همه جهات ثابت و مرز بالایی آزاد گذاشته می‌شود.

#### ۲-۵ همگرایی تونل

در اثر حفاری تمام مقطع تونل با استفاده از دستگاه EPB و با توجه به هندسه دستگاه، قبل از اجرای تزریق، مقداری همگرایی، همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده در مرزهای حفاری اتفاق می‌افتد که باید در مدل‌سازی بطور صحیح پیش بینی شود. برای تعیین میزان همگرایی از پارامتر  $V_L$  (افت حجم)، استفاده می‌شود. برای تونل‌سازی مکانیزه مقدار افت حجم بین ۰/۵ تا ۱/۵ درصد متغیر است. با توجه به قطر حفاری تونل و قطر تمام شده تونل خط یک متروی تبریز، پس از بیشینه همگرایی، مقدار افت حجم برابر ۰/۸۸٪ به دست آمده است.

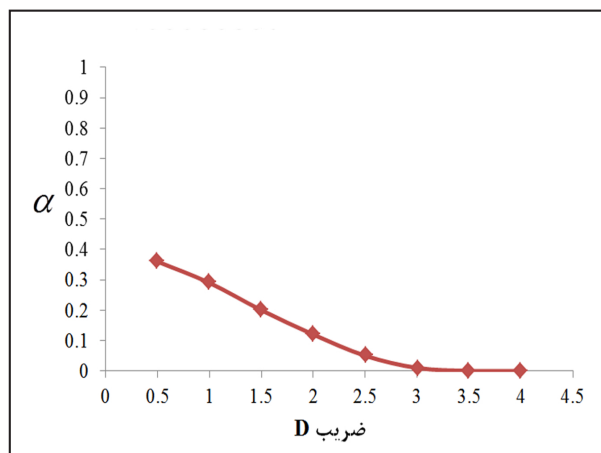
این نرم افزار قابلیت مدل‌سازی خاک، عضو سازه‌ای، اندرکنش بین خاک و سازه و تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی پیچیده را دارد. نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و برجا نشان می‌دهد که خاک محدوده پروژه تطابق خوبی با مدل رفتاری خاک سخت شونده در نرم‌افزار را دارد، بنابراین به منظور مدل‌سازی رفتار خاک از این مدل رفتاری استفاده شده است.

فرآیند مدل‌سازی و نتایج حاصل از مدل‌سازی در زیر شرح داده شده است. فشار سینه‌کار و فشار تزریق در مقطع مورد نظر بر اساس مقادیر عملیاتی در مدل اعمال شده است.

#### ۱-۵ هندسه و شرایط مرزی مدل

برای به دست آوردن ابعاد مدل بهینه به منظور محاسبه دقیق منحنی نشست ساختمان‌ها و سطح زمین قبل و بعد از عبور دستگاه حفاری از زیر و یا کنار ساختمان، تحلیل حساسیت در راستای طولی با توجه به فاصله ابتدا و انتهای ساختمان از مرزهای مدل بر اساس ضریبی از قطر تونل (D) صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، میزان نشست در فاصله ۳ برابر قطر تونل از مقطع ابتدایی و انتهایی ساختمان‌ها ایستامی‌شود. ( $\alpha$  نسبت نشست به نشست بیشینه در مدل‌های

$\alpha = \frac{S}{S_{max}}$	$S_{max}(mm)$	$S(mm)$	فاصله مرز ساختمان‌ها از مرز مدل
۰/۳۶	۲۱/۷۱	۷/۸۳	۰/۵D
۰/۲۹	۲۱/۷۱	۶/۲۰	D
۰/۲	۲۱/۷۱	۴/۳۲	۱/۵D
۰/۱۲	۲۱/۷۱	۲/۵۶	۲D
۰/۰۵	۲۱/۷۱	۱/۰۲	۲/۵D
۰/۰۱۸	۲۱/۷۱	۰/۲۳	۳D
۰	۲۱/۷۱	۰/۰۰۴۲	۳/۵D

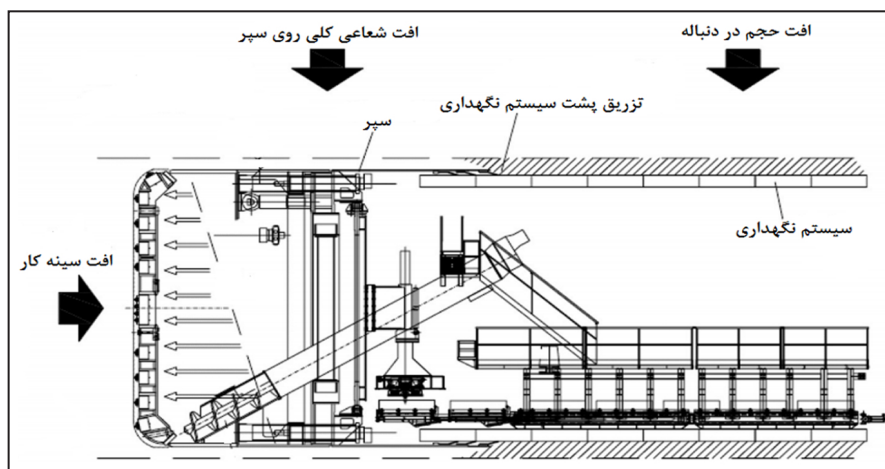


جدول ۴. نتایج تحلیل حساسیت به منظور به دست آوردن ابعاد مدل بهینه

شکل ۷. تحلیل حساسیت نسبت نشست به ازای فواصل مختلف از مرز مدل



## پیش بینی نشست سطح زمین تحت تأثیر تونل سازی مکانیزه...



شکل ۸. مولفه های افت حجم زمین در اثر حفاری دستگاه EPB

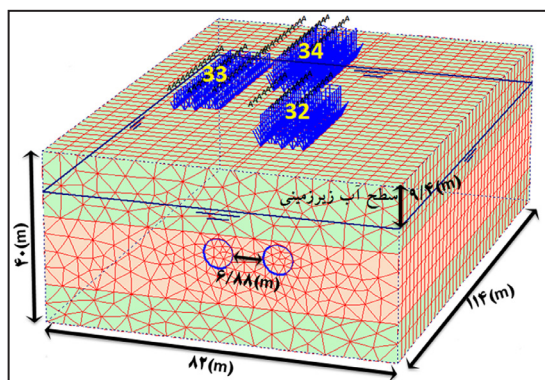
مطالعه همراه با موقعیت تونل ها در مدل ساخته شده در شکل (۹)

نشان داده شده است.

در جدول (۵) مشخصات مقطع مورد بررسی، تعداد فازها و تعداد المان های حفاری در مدلسازی ارایه شده است. لازم به توضیح است که هر فاز حفاری بر اساس طول سیستم نگهداری در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه طول سیستم نگهداری به کار برده شده در خط یک متروی تبریز ۱/۵ متر است، هر فاز حفاری نیز به اندازه ۱/۵ متر در مدل در نظر گرفته شده است. خصوصیات مکانیکی پوشش بتنی و المان سپر دستگاه حفاری مطابق جدول (۶) در نظر گرفته شده است.

## ۳-۵ بارگذاری

با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه در این تحقیق از زیر مناطق مسکونی عبور میکند، تنش قائم بر اساس بار ناشی از سازه های سطحی به صورت گسترده در نظر گرفته شده است. مقدار باری که ساختمان ها وارد می کنند، بر اساس استاندارد استرالیا که برای هر طبقه ۱۰ کیلو نیوتن بار در نظر گرفته است [Australian Standard, 2002]. با توجه به تعداد طبقات ساختمان ها به مدلها اعمال شده است. وضعیت لایه بندی، ابعاد هندسی مدل سه بعدی اجزاء محدود (با توجه به تحلیل حساسیت انجام گرفته)، نحوه مش بندی و وضعیت قرارگیری ساختمان های مقطع مورد



شکل ۹. مدل اجزاء محدود سه بعدی، وضعیت تونل ها و ساختمان های مقطع مورد مطالعه

جدول ۵. مشخصات هندسی، تعداد المان ها و تعداد فازهای مدل اجزاء محدود مقطع مورد بررسی

تعداد فازها	تعداد المان ها	طول مدل (متر)	ارتفاع مدل (متر)	عرض مدل (متر)	عمق کف تونل (متر)	روباره (متر)
۷۶	۱۰۴۷۹	۱۱۴	۴۰	۸۲	۲۲/۶۸	۱۵/۸

جدول ۶. خصوصیات پوشش بتنی و سپر دستگاہ حفاری خط یک متروی تبریز

ضریب پواسون (U)	وزن حجمی W(kN/m/m)	ضخامت معادل d(m)	نوع المان	سختی خمشی EI(kNm <sup>2</sup> /m)	سختی محوری EA(kN/m)	
۰/۲	۷/۵	۰/۳	Elastic	۲۳۴۰۰	۱/۹۶×۱۰ <sup>۶</sup>	پوشش بتنی
۰/۲	۲۸/۸	۰/۲۴۵	Elastic	۵۰۰۰۰	۱×۱۰ <sup>۷</sup>	سپر

جدول ۷. مقایسه ی نتایج حاصل از رفتارنگاری و مدلسازی عددی ساختمان‌های شماره ۱ و ۲

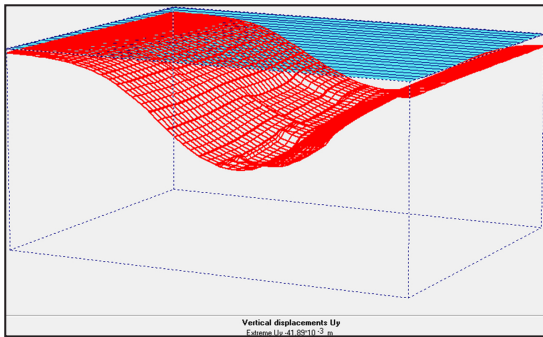
بیشینه نشست سطح زمین (میلیمتر)			شماره ساختمان
میزان اختلاف	مدلسازی	رفتارنگاری	
۴	۹	۵	۱
۳/۵	۱۰	۶/۵	۲

زمین‌شناسی، زاویه‌ی کج شدگی سپر، نرخ نفوذ و فاصله از محل ایستگاه نیز بر روی نشست تاثیرگذارند.

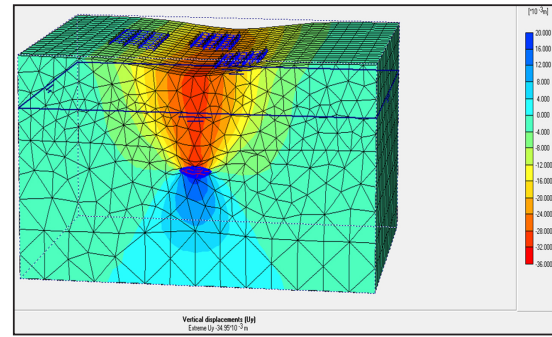
#### ۴-۵ تحلیل نتایج نشست حاصل از مدل عددی

بیشینه جابجایی قائم سطح زمین پس از حفاری تونل اول و تونل دوم در اشکال (۱۰) و (۱۲) ارایه شده است. همچنین پروفیل نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول و تونل دوم تا انتهای مدل در اشکال (۱۱) و (۱۳) نشان داده شده است.

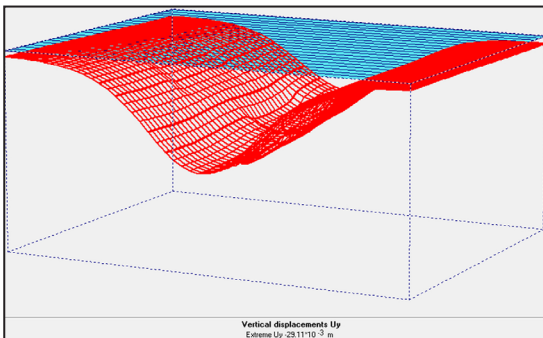
به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدل‌سازی عددی سه بعدی اجزای محدود از نتایج رفتارنگاری ساختمان‌های شماره ۱ و ۲ مسیر پروژه استفاده شده است. زمانی که دستگاہ حفاری به اندازه ۳ برابر قطر تونل از زیر یا کنار ساختمان عبور کرده باشد، برای پایش نشست انتخاب شده است. در جدول (۷) نتایج نشست حاصل از مدل‌سازی عددی و رفتارنگاری ساختمان‌های شماره ۱ و ۲ برای مقایسه آورده شده است. باید توجه داشت که پارامترهایی همچون فشار جبهه کار، فشار تزریق، شرایط



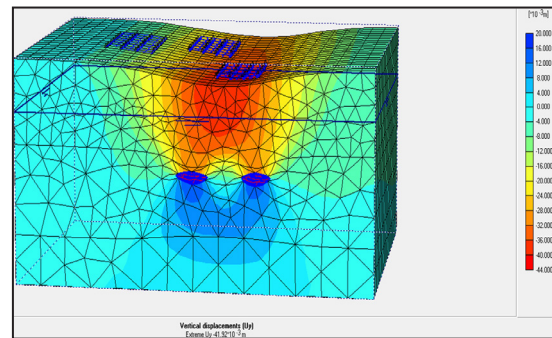
شکل ۱۱. پروفیل جابجایی سه بعدی سطح زمین پس از حفاری تونل اول



شکل ۱۰. جابجایی قائم پس از حفاری تونل اول



شکل ۱۳. پروفیل جابجایی سه بعدی سطح زمین پس از حفاری تونل دوم



شکل ۱۲. جابجایی قائم پس از حفاری تونل دوم

## پیش بینی نشست سطح زمین تحت تأثیر تونل سازی مکانیزه...

حفر تونل اول در نظر گرفته نمی شود، منحنی ها کاملاً متقارن بوده و منحنی نشست سطح زمین پس از حفر تونل دوم نیز به همین صورت دقیقاً روی محور تونل دوم اتفاق می افتد.

### ۷. نتیجه گیری

در این تحقیق، با استفاده از روش های تجربی، تحلیلی و عددی به بررسی وضعیت نشست سطح زمین در مقطع گمانه MBH10 در محدوده ایستگاه های ۱۱ و ۱۲ تونل های دوقلوی قطار شهری تبریز پرداخته شد. همانطور که از نتایج حاصل از روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس مشاهده می شود، میزان نشست بیشینه با در نظر گرفتن تزریق در محل گمانه MBH10 در حالت  $30g =$  بیشترین مقدار و برابر  $13/1$  میلیمتر است و با توجه به مقادیر نشست مجاز در مناطق شهری، این مقدار نشست، کمتر از میزان مجاز نشست است. ولی برای حالت نشست بدون تزریق، این مقدار حدود ۶ برابر میزان نشست مجاز در محل این گمانه است که این مسئله لزوم انجام عملیات تزریق پشت سیستم نگهداری را نشان می دهد. بیشینه نشست پیش بینی شده با روش پک و با استفاده از پارامتر پهنای گودی نشست تعریف شده توسط آقای اتکینسون و پوتس در محل گمانه MBH10 بیشترین مقدار یعنی

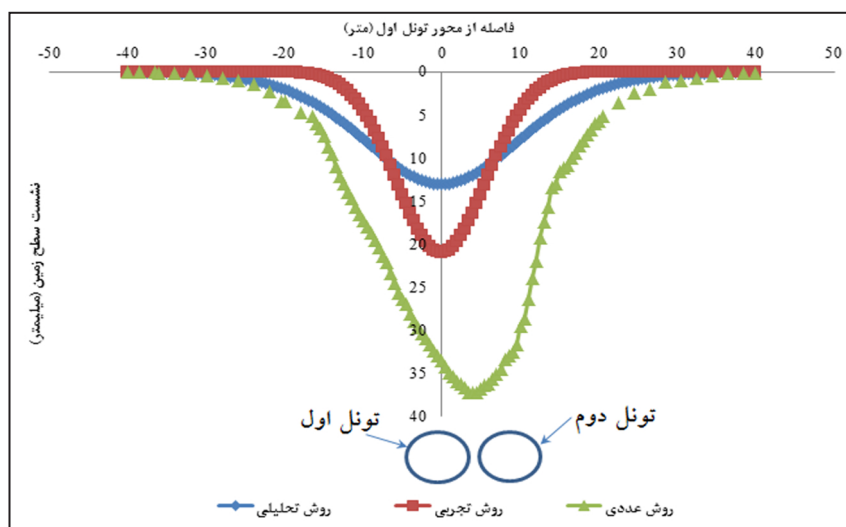
در این مقطع، بیشینه نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول ۳۰ میلیمتر، و پس از حفاری تونل دوم  $37/35$  میلیمتر است. همانطور که در کانتورهای نشست مشاهده می شود، بیشینه جابجایی قائم سطح زمین پس از حفر تونل اول، دقیقاً روی محور تونل اول و پس از حفر تونل دوم این مقدار مابین دو تونل اتفاق افتاده است.

### ۶. مقایسه بیشینه نشست سطح زمین حاصل از روش

#### تجربی، تحلیلی و عددی

مقایسه نتایج حاصل از بیشینه نشست سطح زمین رخ داده در هریک از روش های تجربی، تحلیلی و عددی نشان می دهد که منحنی نشست به دست آمده از روش عددی پس از حفر تونل دوم به سمت تونل دوم (تونل سمت راست) متمایل شده و بیشینه نشست در این حالت مابین دو تونل و نزدیک تونل اول اتفاق افتاده است و همچنین به دلیل وجود سازه های سطحی، منحنی نشست حاصل از مدل عددی به صورت نامتقارن در آمده است (شکل ۱۴).

در روش های تجربی و تحلیلی به دلیل اینکه رهایش تنش پس از حفر تونل اول و برهم خوردن شرایط تنش در زمین پس از



شکل ۱۴. مقایسه نتایج منحنی بیشینه نشست عرضی حاصل از روش تجربی، تحلیلی و عددی

- Franzius, J. N. (2003) "Behavior of building due to tunnel induced settlement". Ph.D. dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine.

- Lambrugh, A., Medina, L. and Castellanza, R. (2012) "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB Mechanized excavation", Computers and Geotechnics Journal, Vol.40, pp.97-113.

- Mahmutoglu, Y. (2011) "Surface subsidence induced by twin subway tunneling in soft ground conditions in Istanbul". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol.70, pp.115-131.

- Migliazza, M., Chiorboli, M. and Giani, G. P. (2009) "Comparison of analytical method, 3D FEM with experimental Subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground", Computers and Geotechnics, Vol.36, pp.113-124.

- Ocak, I. (2009) "Environmental effects of tunnel excavation in soft and shallow ground with EPBM: The case of Istanbul", Environmental Earth Science, Vol.59, pp. 347-352.

- Park, K.H. (2004) "Elastic solution for tunneling-induced ground movement in clays", International Journal of Geomechanics, Vol.4, pp.310-318.

- Sweeney, P. (2006) "A study of interaction effects due to bored tunnels in clay", Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.

- Vittorio, G., Piergiglio, G., Ashraf, M and Shulin, Xu. (2007) "Mechanized tunneling in urban areas: Design methodology & construction control", Taylor and Francis Group, pp.113-150.

۲۱/۰۴ میلیمتر را نشان می‌دهد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر اساس نتایج حاصل از مدل عددی، میزان نشست در این مقطع پس از حفاری تونل اول و تونل دوم، بیشتر از مقدار مجاز نشست در زیر مناطق مسکونی است. بر اساس این نتایج، اتخاذ تدابیر و راهکارهایی جهت جلوگیری از این تغییر مکانها در این مقطع ضروری به نظر می‌رسد و انجام فرآیندهای کنترل نشست مانند تزریق و همچنین مانیتورینگ ویژه برای این ساختمان‌ها باید صورت بگیرد.

## ۸ مراجع

- اتحادیه شرکتهای قطار شهری (۱۳۸۶) "خبرنامه اتحادیه شرکتهای قطار شهری"، شماره ۸.

- شرکت مهندسين مشاور جهاد تحقيقات سهند (بی.تا) "مطالعات ژئوتکنیک قطار شهری تبریز، محدوده خیابان تیمسار محققى".

- Australian Standard (2002) "Earth retaining structures", Australian Standards Institute.

- Bobet, A. (2001) "Analytical solution for shallow tunnels in saturated ground", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.127.

- Chen, R. P., Zhu, J., Liu, W. and Tang, X.W. (2011) "Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils", Journal of Tunneling and Underground Space Technology, Vol.26, pp.163-171.

- Chou, W. and Bobet, A. (2002) "Prediction of ground deformation in shallow tunnels in clay", Journal of Tunneling and Underground Space Technology, Vol.17, pp.3-19.

