

تحلیل عددی نیمرخ طولی و عرضی گودی نشست زمین در اثر تونلسازی با EPB مطالعه‌ی موردی: تونل‌های متروی شیراز

رضا رحمان‌نژاد^{۱*}؛ مهدی اسفندیاری^۲؛ اسحاق نمازی^۳؛ حامد جمشیدی^۴

۱- استاد؛ گروه مهندسی معدن؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن؛ گرایش مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دکترای تخصصی ژئوتکنیک؛ شرکت Golder Associates سنگاپور

۴- کارشناس؛ واحد کنترل EPB؛ شرکت بامراهی شیراز

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۷/۲۳؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۳

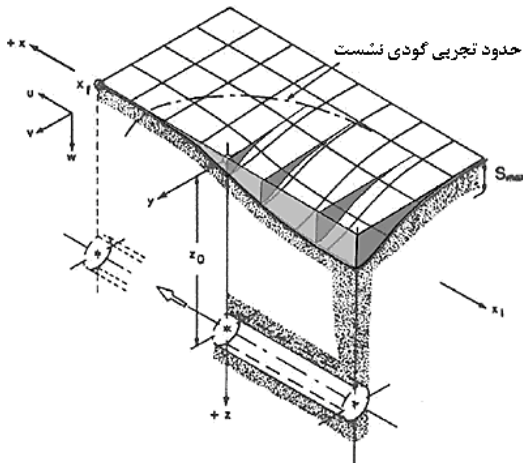
واژگان کلیدی	چکیده
گودی نشست حفاری مکانیزه اجزای محدود روش پک پیش‌بینی تجربی نشست	حفاری در مناطق شهری امری پیچیده و مخاطره‌آمیز است. یکی از مسایل مهم در حین عملیات ساخت تونل‌های مترو بررسی تأثیر مراحل حفاری بر نشست سطح زمین و مهار آن است. برای این منظور بیش‌تر از ماشین‌های فشار تعادلی زمین (EPB) یا انواع دیگر سپرها استفاده می‌شود؛ در نتیجه می‌توان تا حد قابل توجهی جابجایی‌های ناشی از حفاری تونل را کاهش داد. در این مقاله خصوصیات گودی نشست تونل مترو در مسیر بلوار کریم‌خان زند شیراز که با استفاده از دو <i>TBM Shield</i> از نوع EPB حفاری شده، مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نرم‌افزار <i>Plaxis 3D Tunnel</i> بیش‌ترین نشست سطحی و پهنای گودی نشست در اطراف EPB تعیین و تغییرات آن در مراحل پیشروی تونل تحلیل شده است. همچنین جابجایی تاج تونل در امتداد محور طولی تعیین و مقایسه‌ای بین نشست سطحی و عمقی زمین انجام شده است. در نهایت نیز پارامترهای گزاره‌ی تجربی پک در مسیر تونل مترو تعیین و یک گزاره‌ی تجربی برای پیش‌بینی نشست ارائه شده است.

۱- پیشگفتار

است، می‌تواند اختلاف فشار بالا و پایین جبهه‌کار را بسیار دقیق‌تر از دوغاب و هوای فشرده تامین نماید. تحلیل اثرات حفاری با EPB TBM بر روی زمین و سازه‌ها و بررسی گودی نشست (*Settlement Trough*) سطحی به وجود آمده در اطراف ماشین به علت وجود پارامترهای متعدد مانند فشار در جبهه‌کار، سیکل‌های حفاری، نصب سگمنت‌ها پس از هر سیکل حفاری و عملیات تزریق در پشت سگمنت، مسئله‌ای سه‌بعدی است. تا کنون روش‌های مختلفی برای تعیین خصوصیات گودی نشست مطرح شده است. از این میان می‌توان به روش‌های تجربی

ماشین‌های حفاری فشار تعادلی زمین برای مهار افت زمین در بالا، جلو و پشت ماشین حفاری به کار می‌روند. فشار جبهه‌کار در ماشین EPB با اعمال فشار منتقل شده از دیواره‌ی خاک (*Bulk Head*) جلوی ماشین حفار به جبهه‌کار از خاک حفاری شده در اطاقک پشت کله‌ی حفار (*Cutter Head Chamber*) تامین می‌شود [1]. خاک حفاری شده توسط دستگاه که با شرایط زمین مقابل خود یعنی جبهه‌کار، همخوانی و شباهت بسیاری دارد و از نظر وجود آب و وزن مخصوص نزدیک به زمین دست نخورده

مقطع‌های معین در حال پیشروی و همچنین گودی نشست طولی محاسبه می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- نمای سه بعدی گودی نشست در اثر حفر تونل [2]

مولفه‌های اصلی تغییر شکل زمین مربوط به حفاری با ماشین EPB به شرح زیر است (شکل ۲، [2] و [5]):

- حرکت زمین به سمت جبهه‌کار بر اثر آزادسازی تنش (مولفه‌ی a)
- نشست در طول سپر به علت اضافه حفاری، حالت مخروطی سپر و عوامل دیگر (مولفه‌ی b)
- حرکت شعاعی به سمت فضای خالی بخش انتهایی سپر به دلیل تفاوت شعاع سپر و شعاع حفاری تونل (مولفه‌ی c)
- تغییر شکل شعاعی زمین به سمت پوشش نگهداری در اثر تغییر شکل سگمنت‌های نگهداری و همگرایی دیواره‌ی پوشش با سپری شدن زمان و دور شدن دستگاه (مولفه‌ی d)

۳- ساخت مدل اندرکنش تونل - خاک

در این مقاله، مسیر مترو به طول تقریبی ۴٫۵ کیلومتر در امتداد بلوار کریم‌خان زند شیراز تحلیل شده است. برای ساخت تونل‌های مترو در بخشی از مسیر (میدان الله تا نمازی) از دو *TBM Shield* از نوع EPB استفاده شده است [۹]. پایداری جبهه‌کار هنگام استفاده از EPB با فشار ناشی از انباشته شدن خاک حفاری شده در اطاقک حفاری پشت

مانند روش‌های پک (*Peak*) و اوراییلی و نیو (*O'Reilly & New*) برای تخمین گودی نشست دو بعدی و روش وودمن و اتول (*Woodman & Attewell*) برای تخمین گودی نشست سه‌بعدی [2] و روش‌های تحلیلی مانند روش پولوس و لاگانتان (*Poulos & Loganathan*) [3] و روش پارک (*Park*) [4] اشاره نمود.

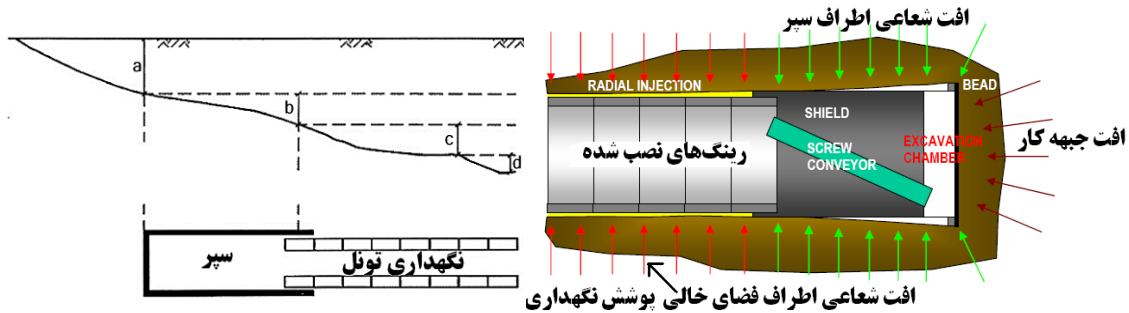
یکی از روش‌های رایج برای تخمین و تحلیل نشست تونل‌ها، روش عددی است. بر خلاف روش‌های پیشین، روش‌های عددی قابلیت لحاظ کردن خصوصیات ساخت و خصوصیات زمین شامل هندسه، تنش‌های اولیه، رفتار زمین و مراحل حفاری در ساخت مدل و انجام محاسبات را دارند [5]. برینک‌گرو و بروئر (*Brinkgreve & Broere*) نشست و اندرکنش ساخت یک تونل در زیر یک ساختمان با پی‌های شمع را با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی و نرم‌افزار *Plaxis 3D Tunnel* شبیه‌سازی نمودند [6]. آن‌ها انجام عملیات حفاری توسط ماشین تونل‌زنی سپری را به صورت مرحله‌ای مدل و جنبه‌های اساسی تونل‌زنی سپری مانند فشار جبهه‌کار، نصب سگمنت‌های نگهداری، تزریق دوغاب در پشت سگمنت‌ها و حالت مخروطی سپر را در ساخت مدل لحاظ نمودند. چنگ (*Cheng*) و همکاران اثرات عبور تونل‌های دوقلوئی مترو از اطراف پایه‌های عمیق یک پل راه‌آهن در سنگاپور را با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS* به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی نمودند [7]. زیانگ (*Xiang*) و همکاران نشست و تاثیرات حفر تونل‌های دوقلو بر روی شمع‌های پایه یک پل روگذر در پکن را با استفاده از تحلیل‌های تجربی، تئوری و همچنین شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند [8].

در این مقاله خصوصیات و شکل گودی نشست ایجاد شده در اطراف ماشین حفاری EPB در مقاطع عرضی (عمود بر محور تونل) و طولی (در امتداد محور تونل) با فواصل متفاوت از جبهه‌کار با نرم‌افزار *Plaxis 3D Tunnel* مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای گزاره‌ی تجربی پک برای مسیر مترو در امتداد بلوار کریم‌خان زند شیراز تعیین شده است.

۲- گودی نشست سه‌بعدی

برای بررسی نشست زمین، گودی‌های نشست عرضی در

سپر تامین می‌شود. بنابراین تنها بخشی از مواد حفاری شده به خارج از دستگاه و سطح زمین ارسال می‌شود.

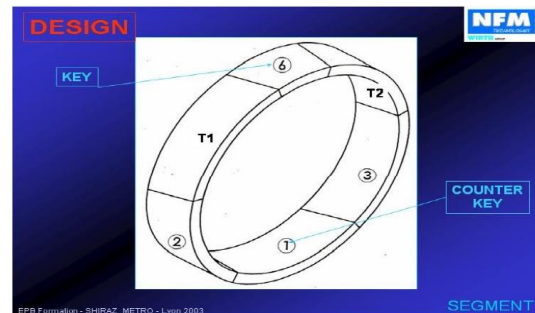


شکل ۲- مولفه‌های اصلی نشست در اطراف ماشین EPB [5]

گام به گام حفاری تونل رعایت شود. به این گونه که در هر فاز یک سیکل حفاری که شامل پیشروی تونل به اندازه‌ی ۱٫۴ متر (طول تقریبی یک رینگ نگهداری)، وارد شدن فشار جبهه‌کار در جلوی دستگاه حفاری و همچنین نصب سگمت‌های نگهداری در انتهای سپر و عملیات تزریق پشت سگمت‌ها در حین حفاری است، مدل شده و سپس در فاز بعد، مراحل انجام شده در فاز قبل با انتقال بخش‌های مدل شده در فاز قبل به اندازه‌ی یک سیکل حفاری تکرار شده است. بنابراین می‌توان فرآیند ساخت تونل را به مراحل ساخت با طول رینگ ۱٫۴ متر (طول یک سیکل حفاری) تقسیم نمود.

برای مدلسازی اندرکنش تونل-خاک و همچنین مدل کردن عملیات گام به گام حفاری در این مقاله از نرم‌افزار سه‌بعدی *Plaxis 3D tunnel* استفاده شده است. خاک اطراف تونل توسط المان‌های حجمی ۱۵ گره‌ای و سپر دستگاه حفاری توسط المان‌های ۸ گره‌ای صفحه یا *Plate* مدل شده است [10]. طول سپر تقریباً برابر با طول ۷ رینگ نگهداری است. برای حفظ پایداری جبهه‌کار تونل، فشار افقی ناشی از فشار تعادلی زمین مدل شده است. بدین منظور فشاری با مقدار 180 KN/m^2 در تاج تونل و با تغییرات $15 \text{ KN/m}^2 / \text{m}$ در جهت عمود بر سطح جبهه‌کار اعمال شده است. همچنین فشار گروت تزریق شده در پشت سگمت‌ها بوسیله‌ی فشار آب منفذی محلی متغیر مدل شده است. مقدار فشار گروت در تاج تونل برابر با 200 KN/m^2 با تغییرات $17 \text{ KN/m}^2 / \text{m}$ در جهت پایین در نظر گرفته شده است. به منظور مدل کردن اضافه‌حفاری

قطر حفاری دستگاه ۶٫۸۸ متر است. ضخامت سگمت‌های مورد استفاده در پروژه‌ی شیراز ۳۰ سانتی‌متر و عرض آن‌ها متغیر از ۱۳۸ تا ۱۴۲ سانتی‌متر و قطر خارجی و داخلی رینگ ساخته شده توسط سگمت‌ها به ترتیب برابر ۶۶۰ و ۶۰۰ سانتی‌متر است. هر رینگ از ۶ سگمت تشکیل شده است. شکل هندسی ۴ قطعه از سگمت‌ها به صورت متوازی‌الاضلاع است که دو به دو قرینه است و دو قطعه‌ی دیگر دوزنقه‌شکل است (شکل ۳). در جدول ۱ نیز خصوصیات صفحه‌ی معادل سگمت آورده شده است.



شکل ۳- سگمت‌های حلقه‌ی نگهداری [۹]

جدول ۱- خصوصیات المان‌های صفحه‌ی معادل سگمت [۹]

θ	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)
۰٫۱۵	$9,42 \times 10^6$	$7,065 \times 10^4$

در مراحل مدلسازی این پژوهش تلاش شده است برای نزدیک شدن نتایج مدلسازی به واقعیت، فرآیند ساخت

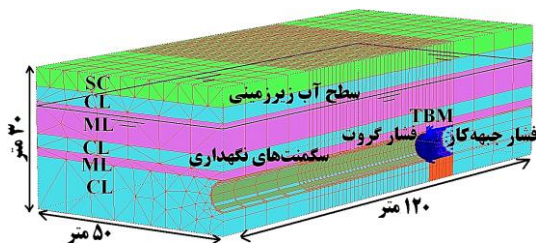
جدول ۲ لایه‌بندی و خصوصیات ژئومکانیکی خاک در ناحیه تا عمق ۳۰ متری از سطح زمین آورده شده است.

دستگاه و همچنین باریک‌شوندگی سپر، فاکتور انقباض برابر با ۰/۵ درصد به سپر دستگاه اختصاص داده شده است. در

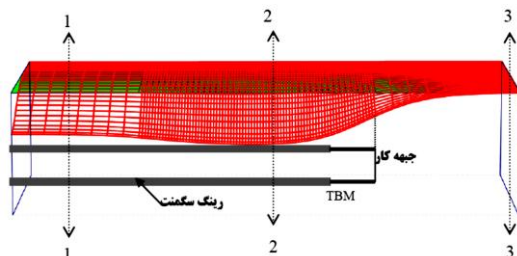
جدول ۲- خصوصیات ژئومکانیکی خاک در ناحیه‌ی مورد مطالعه [۱۱]

عمق (متر)	نوع خاک	γ_{dry} ($\frac{gr}{cm^3}$)	γ_{sat} ($\frac{gr}{cm^3}$)	C_u ($\frac{kg}{cm^2}$)	C' ($\frac{kg}{cm^2}$)	ϕ' (°)	E ($\frac{kg}{cm^2}$)	θ
۴-۰	SC	۱,۶	۱,۹	-	۰,۳	۳۴-۳۳	۵۲۵	۰,۳
۷,۲-۴	CL/ML	۱,۷	۲,۰۸	۱,۲	۰,۴	۳۰-۲۹	۹۰۰	۰,۲۵
۱۳,۹-۷,۲	ML	۱,۶۹	۲,۰۹	۱,۱۵	۰,۱	۳۲-۳۱	۳۰۰	۰,۲۵
۱۶,۹-۱۳,۹	CL	۱,۷	۲,۰۸	۱,۲	۰,۲	۳۰-۲۹	۹۰۰	۰,۲۵
۱۸,۷-۱۶,۹	CL/ML	۱,۶۹	۲,۰۹	۱,۱۵	۰,۱	۳۲-۳۱	۹۰۰	۰,۲۵
۳۰-۱۸,۷	CL/ML SM,GM	۱,۷۷	۲,۰۸	۱,۲	۰,۱	۳۰-۲۹	۹۰۰	۰,۲۵

تونل، تعیین نشست پایدار است. گودی نشست پایدار هنگامی ایجاد می‌شود که با پیشروی تونل، شکل سه‌بعدی گودی نشست و همچنین بیش‌ترین نشست ثابت باقی بماند. برای تعیین نشست‌های پایدار، یک تحلیل سه‌بعدی باید انجام شود [12]. در مدل عددی ساخته شده برای اطمینان از رسیدن به حالت پایدار تعداد ۴۰ برش حفاری مدل شده است. شکل ۵ گودی نشست سه‌بعدی ایجاد شده در پایان حل مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مدل نهایی سه‌بعدی اندرکنش خاک و تونل [۹]



شکل ۵- گودی نشست سه‌بعدی پایدار [۹]

سطح آب زیرزمینی با توجه نیمرخ طولی مسیر مورد مطالعه از میدان ولی‌عصر تا میدان نمازی شیراز در عمق ۸,۲ متری از سطح زمین در نظر گرفته شده است [۹].

مدل دوبعدی اولیه با احتساب تقارن، دارای عرض ۵۰ متر (۷,۵۸D) و ارتفاع ۳۰ متر (۴,۵۵D) و ارتفاع روباره ۱۸,۷ متر است. نیمی از تونل با قطر داخلی ۶,۶ متر و ضخامت رینگ نگهداری برابر با ۳۰ سانتی‌متر، در سمت راست، مدلسازی شده است. در ساخت مش سه‌بعدی برای مدل کردن فرآیند احداث تونل، حفر ۴۰ برش هر یک به طول ۱,۴ متر (در مجموع ۵۶ متر یا ۸,۴۸D) در ۳۵ فاز مدل در نظر گرفته شده است. به ابتدای مدل اولیه بخشی به طول ۳۰ متر (۴,۵۵D) و در انتهای مدل، بخشی به طول ۳۴ متر (۵,۱۵D) برای کاهش اثرات شرایط مرزی و همچنین بررسی دقیق گودی نشست طولی در امتداد محور تونل به مدل افزوده شده است. در واقع فرض بر این است که ۳۰ متر ابتدایی قبلاً حفاری و سگمنت‌گذاری شده و همچنین ۳۴ متر انتهایی دست نخورده باقی مانده است. در نهایت یک مدل سه‌بعدی با تعداد ۷۶۸۰ المان ۱۵ گره‌ای و تعداد کل ۲۳۶۵۶ گره ساخته شده است (شکل ۴).

۴- بررسی خصوصیات گودی نشست سه‌بعدی با استفاده از نتایج مدلسازی عددی

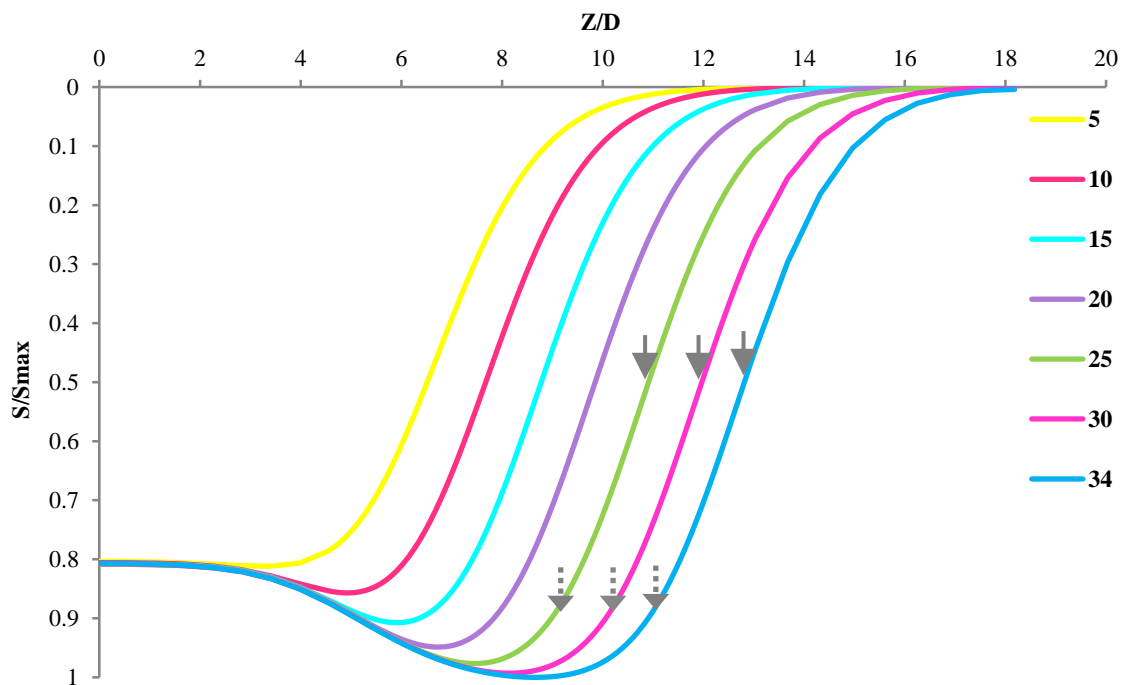
یکی از شرایط اساسی در تحلیل گودی نشست ناشی از حفر

می‌کند. بعلاوه در شکل دیده می‌شود که مقدار نشست در فاصله‌ی دور از جبهه‌کار به یک مقدار ثابت و کمتر از نشست حداکثر، برابر با ۵٫۲۹ میلی‌متر (۸۰٫۷۶ درصد نشست حداکثر) می‌رسد.

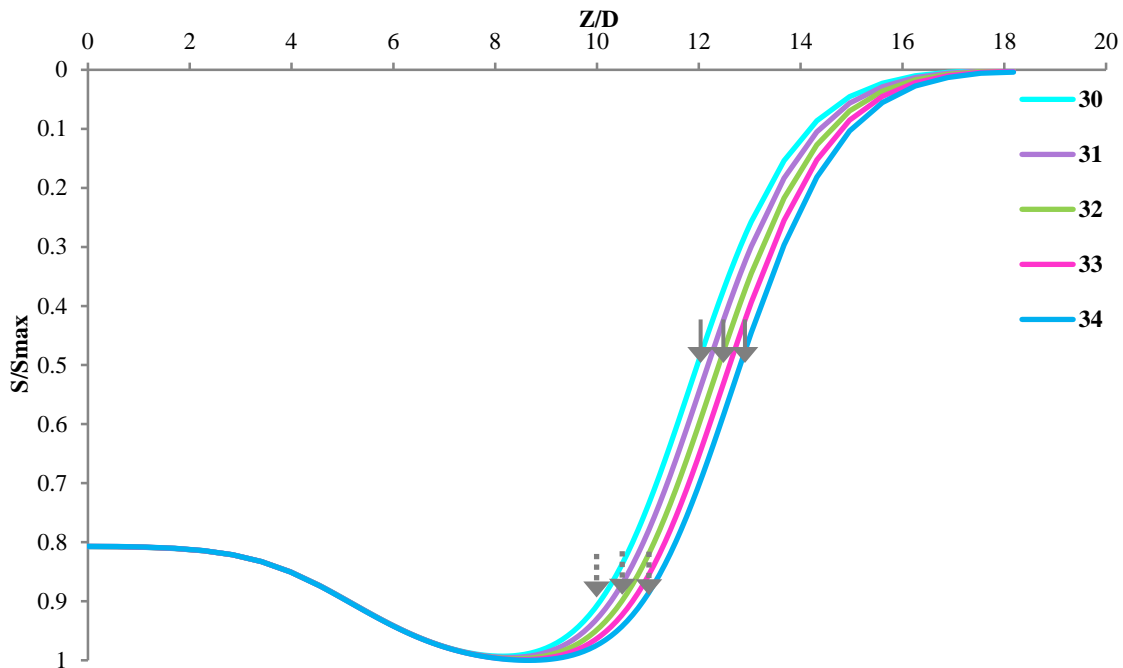
بالازدگی پشت سپر موضوع جالب توجهی است که در گزارش و تحقیقات افراد مختلف مانند مولر (Moller) [12]، نمازی (Namazi) [14]، فرانزیوس (Franzius) [15]، نگ و لی (Ng & Lee) [16] به آن اشاره شده است. طبق نظر مولر شکل گودی نشست ایجاد شده در قسمت سمت چپ شکل ۶ وابسته به شرایط مرزی در آن سمت مدل است. به گونه‌ای که اگر همانند مدل حاضر، اولین فاز حفاری تونل با نصب نگهداری بلافاصله در برش ابتدایی آغاز شود، گودی نشست طولی همانند منحنی (الف) در شکل ۸ خواهد بود؛ اما اگر در مدلسازی حفر تونل، نگهداری لحاظ نشود، منحنی (ب) در شکل ۸ به دست خواهد آمد [12]. نمازی و فرانسیس این نمونه از بالازدگی را مرتبط با ابعاد مدل دانسته و معتقدند با افزایش ابعاد مدل، بالازدگی کاهش می‌یابد. اما نگ و لی آن را مرتبط با بالا بودن فشار جانبی زمین و یا تغییر تنش موثر می‌دانند [16].

۴-۱- گودی نشست طولی سطحی (Surface Longitudinal Settlement)

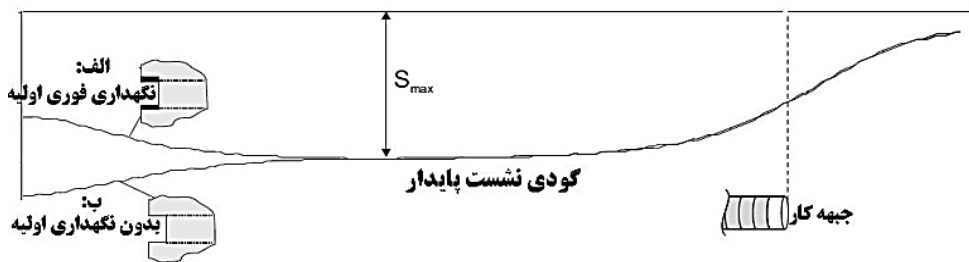
شکل ۶ تغییرات گودی نشست طولی سطح زمین را در چند فاز پیشروی تونل نشان می‌دهد. در نمودارهای ارایه شده، محورها به صورت بی‌بعد تعریف شده‌اند. محور افقی بر حسب فاصله در جهت طولی (Z) یا عرضی (X) نسبت به قطر تونل (۶٫۶ متر) و محور عمودی بر حسب نشست ایجاد شده (S) نسبت به نشست حداکثر (S_{max}) تعریف شده است. با پیشروی تونل به مقدار نشست حداکثر ایجاد شده در هر فاز افزوده شده و سرانجام به یک مقدار ثابت میل می‌کند. این حقیقت را می‌توان به صورت دقیق‌تر در شکل ۷ برای ۵ فاز نهایی پیشروی مشاهده کرد. هر رنگ در شکل، اشاره به یک فاز خاص دارد. همچنین در شکل ۷ مشاهده می‌شود که شکل گودی نشست به یک حالت ثابت رسیده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گودی نشست نهایی سه‌بعدی به دست آمده در شکل ۷ گودی نشست پایدار است [13]. با استناد به گودی نشست پایدار دیده می‌شود که مقدار نشست حداکثر تقریباً در فاصله‌ای برابر با $3D$ قبل از جبهه‌کار به یک مقدار ثابت برابر با ۶٫۵۵ میلی‌متر میل



شکل ۶- تغییرات گودی نشست طولی سطحی با فازهای پیشروی (↓ محل جبهه کار، ↓↓ محل نصب سگمنت)



شکل ۷- پایدار شدن گودی نشست در فازهای نهایی مدلسازی (↓ محل جبهه کار، √ محل نصب سگمنت)



شکل ۸- شکل نیمرخ نشست طولی - الف: با نگهداری اولیه، ب: بدون نگهداری اولیه [12]

یکسان و برابر با ۵/۴۹ میلی‌متر (۸۳/۸۱ درصد نشست حداکثر) است. با مقایسه‌ی نشست در جبهه‌کار و در مکان نصب اولین نگهداری می‌توان نتیجه گرفت که نشست برای ۳۹/۲۳ درصد نشست حداکثر در امتداد سپر و ناحیه‌ی تزریق رخ می‌دهد. همچنین مقدار ۱۶/۱۹ درصد نشست حداکثر در امتداد رینگ نگهداری رخ می‌دهد.

۴-۲- گودی نشست عرضی سطحی (Surface Cross-Section Settlement)

در این قسمت تاثیر پیشروی جبهه‌کار بر منحنی نشست عرضی بررسی می‌شود. در شکل ۹ نشست عرضی در شش مقطع سطحی که در فواصل متفاوت در جلو و پشت

نکته مهم و قابل تامل دیگر، مقدار نشست در جبهه‌کار است. فلاش‌های توپر موجود در شکل ۶ و شکل ۷ مکان جبهه‌کار را در فاز حفاری مورد نظر نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود نشست ایجاد شده در جبهه‌کار در تمام فازها با هم مساوی و برابر با ۲/۹۲ میلی‌متر (۴۴/۵۸ درصد نشست حداکثر) است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مکان جبهه‌کار در واقع نقطه‌ی عطف منحنی گودی نشست طولی است؛ به این معنی که بیش‌ترین شیب منحنی نشست طولی در بالای جبهه‌کار قرار دارد. فلاش‌های نقطه چین در این شکل‌ها مکان نصب اولین رینگ سگمنت در عقب سپر را نشان می‌دهد. مقدار نشست در این نقاط

جابجایی عمودی در تاج تونل دقیقاً قبل از نصب اولین رینگ نگهداری در عقب *TBM* رخ می‌دهد که برابر با ۲۴/۹۴ میلی‌متر است. همچنین می‌توان دید که پس از نصب پوشش، جابجایی تاج تونل به سرعت به یک مقدار پایدار و برابر با ۱۹/۵ میلی‌متر (۷۸/۱۸ درصد نشست ماکزیمم) میل می‌کند. میزان نشست رخ داده در جبهه‌کار تاج تونل برابر با ۵/۵۱ میلی‌متر (۲۲ درصد نشست ماکزیمم) است.

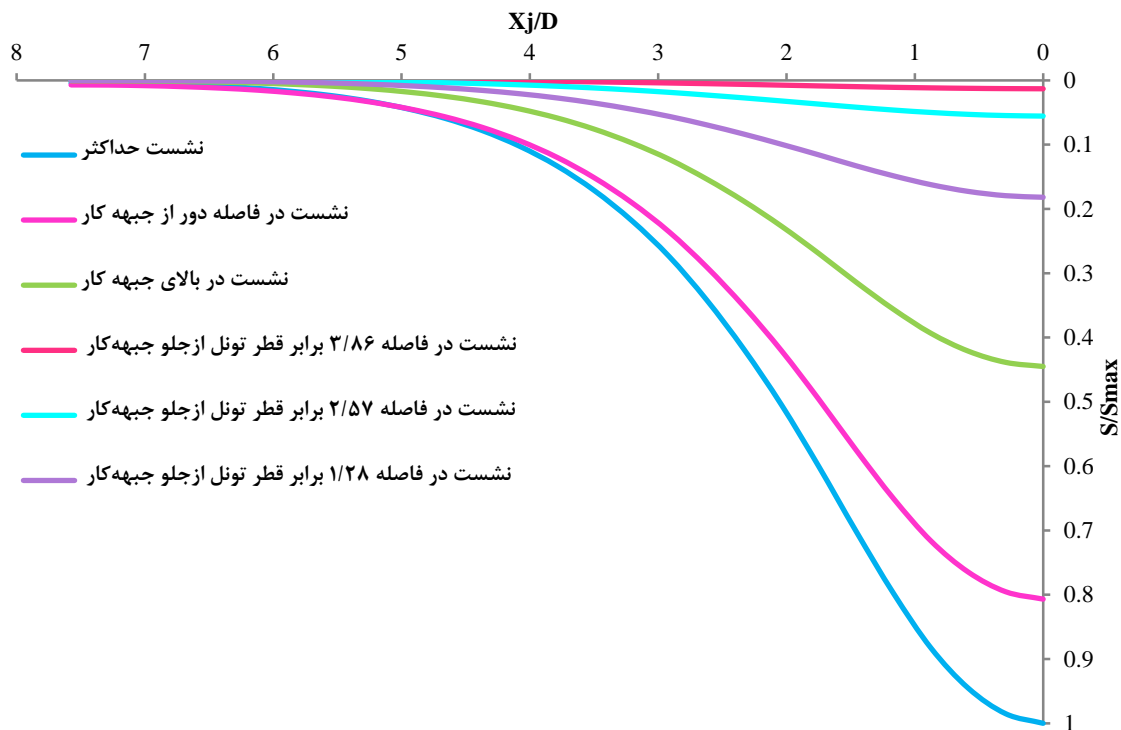
در شکل ۱۱ گودی نشست طولی سطح زمین و تاج تونل در فاز نهایی با هم مقایسه شده‌اند. محور عمودی بر حسب نسبت نشست ایجاد شده به نشست حداکثر در تاج تونل بیان شده است. با توجه به شکل حداکثر نشست رخ داده در سطح زمین برابر با ۲۶ درصد نشست حداکثر در تاج تونل است. بعلاوه در جبهه‌کار نشست تاج تونل ۱/۹ برابر نشست رخ داده در سطح است؛ در حالی که در انتهای سپر نشست رخ داده در تاج تونل ۴/۷۶ برابر نشست رخ داده در سطح زمین است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بیش‌ترین نشست رخ داده در تاج تونل در امتداد سپر رخ می‌دهد.

جبهه‌کار قرار دارند، با هم مقایسه شده‌اند. مقادیر محور عمودی در شکل به صورت ضریبی از نشست حداکثر در مقطع دارای نشست ماکزیمم ارایه شده است.

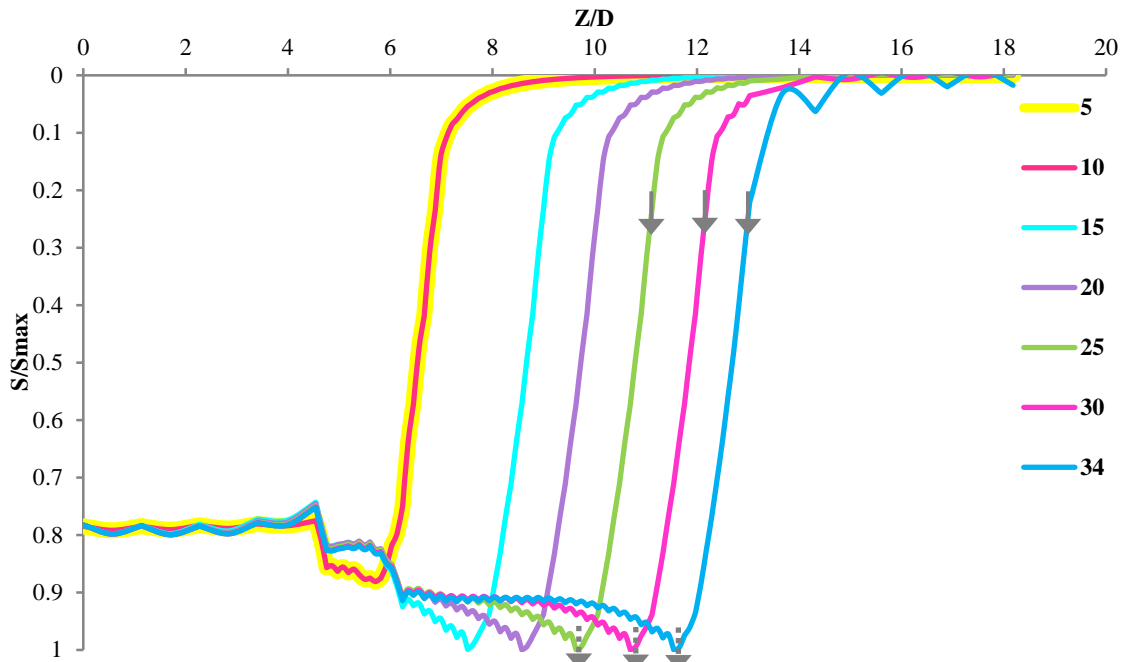
در شکل ۹ با نزدیک شدن به جبهه‌کار از بخش حفاری نشده‌ی جلوی جبهه‌کار به پهنای گودی نشست و همچنین به حداکثر نشست به وجود آمده در آن مقطع افزوده می‌شود، این تغییرات به تدریج تا مقطع با نشست حداکثر ادامه یافته ولی از این فاصله به بعد با دور شدن از جبهه‌کار از نشست حداکثر در مقطع عرضی کاسته می‌شود و سرانجام اندازه‌ی نشست به یک مقدار پایدار میل می‌کند.

۳-۴- نشست طولی تاج تونل (*Crown Longitudinal Settlement*)

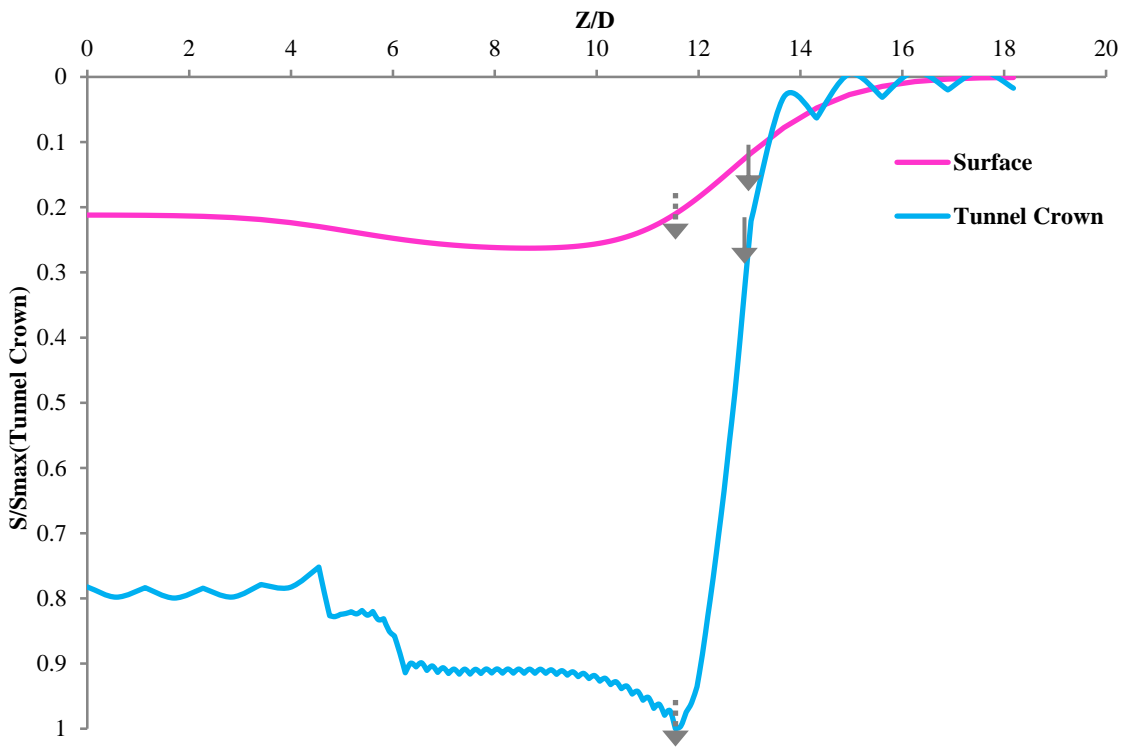
شکل ۱۰، تغییرات جابجایی عمودی تاج تونل را در فازهای متوالی پیشروی نشان می‌دهد. با توجه به شکل بیش‌ترین جابجایی‌ها در تاج تونل، پس از رسیدن *TBM* به آن نقطه ایجاد می‌شود. فلاش‌های توپر مکان جبهه‌کار تونل و فلاش‌های نقطه‌چین مکان تزریق و شروع نصب سگمنت را در فاز مربوط را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که حداکثر



شکل ۹- مقایسه‌ی نشست سطحی عرضی در مقاطع مختلف در گودی نشست پایدار



شکل ۱۰- تغییرات نشست طولی در تاج تونل (↓ محل جبهه کار، ↓↓ محل نصب سگمنت)



شکل ۱۱- مقایسه‌ی نشست طولی تاج تونل با نشست سطح زمین در فاز نهایی حفاری تونل (↓ محل جبهه کار، ↓↓ محل نصب سگمنت)

$$S = S_{max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$S_{max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} = V_L(\%) \times \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi i}} \quad (2)$$

$$= \frac{0.313V_L(\%)D^2}{i}$$

$$S_{max} = 0.785(\gamma Z_0 + P_s) \times \left(\frac{D^2}{i \cdot E}\right) \quad (3)$$

در جدول ۳ تعدادی از گزاره‌های ارایه شده برای تعیین فاکتور پهنای گودی نشست (i) آورده شده است.

۵- تخمین گودی نشست عرضی با استفاده از روش تجربی

پک گودی نشست زمین بکر را با یک منحنی گوسی به صورت گزاره‌ی (۱) تخمین زده است [5]. در گزاره‌ی (۱)، دو مجهول i و S_{max} وجود دارد. اوراییلی و نیو گزاره‌ی (۲) را برای تعیین S_{max} ارایه داده‌اند [2]. همچنین هرزراگ گزاره‌ی (۳) را برای تعیین حداکثر نشست پیشنهاد داده است [2]. این گزاره بر اساس داده‌های حاصل از تونل‌های حفاری شده توسط TBM و $NATM$ تعیین شده است.

جدول ۳- گزاره‌های برآورد فاکتور پهنای گودی نشست [17]

نام محقق	گزاره	توضیحات
پک (۱۹۶۹)	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^n$ $n = 0.8 - 1.0$	برای محدوده‌ی وسیعی از خاک‌ها
اتکینسون و پات (۱۹۷۹) (Atkinson & potts)	$i = 0.25(Z_0 + R)$ $i = 0.25(1.5Z_0 + 0.5R)$	ماسه‌ی سست ماسه‌ی متراکم و رس بیش‌تحکیمی
اوراییلی و نیو (۱۹۸۲)	$i = 0.43Z_0 + 1.1$ $i = 0.28Z_0 - 0.1$	خاک چسبنده خاک دانه‌ای
میر (۱۹۸۳) (Mair)	$i = 0.5Z_0$	برای خاک‌های رسی

نیوتون و بخش Solver نرم‌افزار Excel استفاده شده است. فاصله‌ی عرضی از مرکز تونل از گزاره‌ی (۴) به دست می‌آید.

$$y = |x_j - x_{smax}| \text{ \& } 0 \leq x_j \leq 50 \quad (4)$$

بنا به تقارن صفحه‌ای (مطابق شکل ۴) فرض می‌شود که نقطه‌ی نشست حداکثر در بالای تاج تونل قرار دارد، بنابراین:

$$x_{smax} = 0 \rightarrow y = x_i \quad (5)$$

پس از حل مدل عددی با نرم‌افزار Plaxis و تعیین گودی نشست عرضی، مختصات آن (x_j) وارد نرم‌افزار Excel شده و برای مجهولات گزاره‌ی (۱) یعنی i و S_{max} در هر یک از سه مقطع مورد نظر سلول‌هایی به عنوان سلول‌های مرجع اختصاص داده شده است. سپس برای برازش منحنی بر داده‌های عددی، مطابق با گزاره‌ی توزیع نشست پک، به سلول‌های مرجع مقادیر حدسی اولیه اختصاص داده و با روش سعی و خطا بهینه‌سازی آن‌ها انجام شده است. در اولین تقریب، برای انتخاب اولیه‌ی پارامترها از داده‌های به دست آمده از نرم‌افزار عددی کمک گرفته شده است. مقدار خطا با استفاده از گزاره‌ی (۶) به دست می‌آید:

۵-۱- تخمین گودی نشست عرضی با استفاده از روش نیمه‌تجربی

هر کدام از گزاره‌های موجود در جدول ۳ برای یک شرایط خاص زمین و تونل استخراج شده‌اند و تعمیم آن‌ها به موارد دیگر چندان امکان‌پذیر نیست. شرایط خاک‌های ناهمگن این مشکلات را تشدید می‌کند. در این پژوهش برای محاسبه‌ی پارامترهای i و S_{max} از نرم‌افزار عددی استفاده شده است. بدین منظور در سه مقطع سطحی از گودی، نشست پایدار داده‌های مربوط به جابجایی عمودی (نشست) مدل‌های ساخته شده با نرم‌افزار استخراج و نتایج به نرم‌افزار Excel وارد و سپس نمودار توزیع نشست هر سه مقطع رسم شده است. سه مقطع مورد بررسی در شکل ۵ عبارتند از:

- مقطع در فاصله‌ی دور از جبهه‌کار (مقطع ۱-۱)
 - مقطع با نشست سطحی حداکثر (مقطع ۲-۲)
 - مقطع قرار گرفته در بالای جبهه‌کار (مقطع ۳-۳)
- برای تطابق گزاره‌ی توزیع نشست پک با منحنی توزیع نشست محاسبه شده توسط نرم‌افزار از روش سعی و خطای

داده شده است. محور عمودی در نمودارها برحسب نسبت نشست به نشست حداکثر حاصل از مدلسازی عددی در مقطع عرضی مورد نظر است.

۱- برای مقطع در فاصله‌ی دور از جبهه‌کار (شکل ۱۲):
 $S_{\max(\text{Formula})} = 5.28\text{mm} = S_{\max(\text{Model})}$ (۸)

$$\& i \approx 12m \approx 1.82D$$

۲- مقطع با نشست سطحی حداکثر (شکل ۱۳):

$$S_{\max(\text{Formula})} = 6.50\text{mm} = 0.99S_{\max(\text{Model})}$$
 (۹)

$$\& i \approx 12m \approx 1.82D$$

براساس نتایج حاصل از این روش، فرمول تجربی گودی نشست در اثر حفر تونل در مقطع عرضی با نشست حداکثر به صورت گزاره‌ی (۱۰) تعیین شده است. با این گزاره می‌توان نیمرخ گودی نشست عرضی حداکثر تونل متروی شیراز را در مسیر مورد بررسی تعیین نمود.

$$S = 6.50 \exp\left(\frac{-y^2}{288}\right)$$
 (۱۰)

۳- در مقطع قرار گرفته در بالای جبهه‌کار (شکل ۱۴):

$$S_{\max(\text{Formula})} = 2.89\text{mm} = 0.99S_{\max(\text{Model})}$$
 (۱۱)

$$\& i \approx 12m \approx 1.82D$$

$$\Delta S^j = |S_{\text{Model}}^j - S_{\text{Formula}}^j|$$
 (۶)

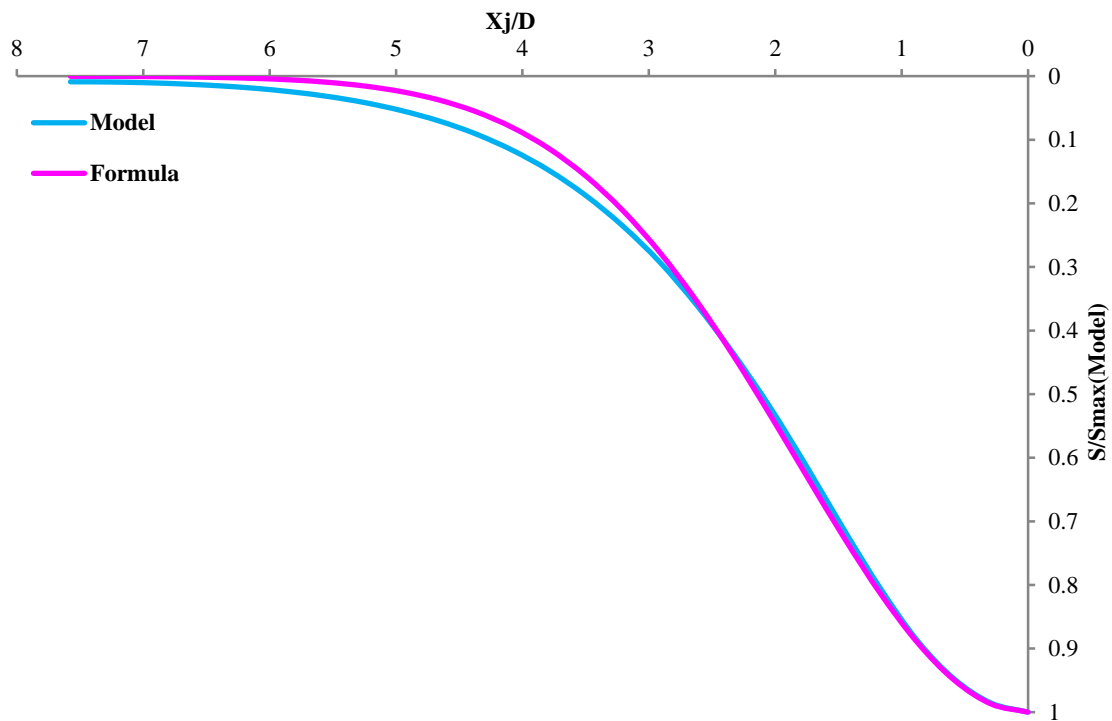
هنگامی که این دو منحنی بر هم تطابق پیدا می‌کنند مقدار خطا به سمت صفر میل خواهد نمود. چون این شرط باید برای تمامی x ها صادق باشد، بنابراین می‌توان شرط تطابق را به صورت گزاره‌ی (۷) تعریف کرد:

$$\lim \sum_{j=1}^n \Delta S^j \rightarrow 0$$
 (۷)

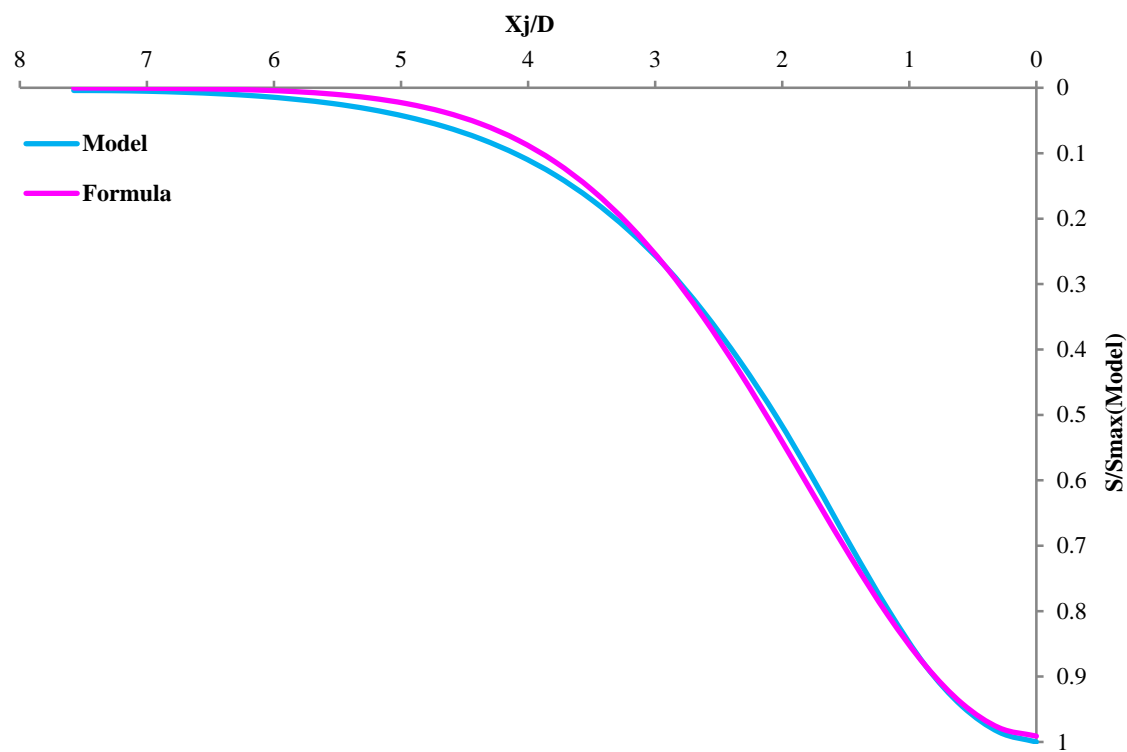
با توجه به گزاره‌ی (۷)، مجموع قدر مطلق اختلاف نشست نتیجه شده از گزاره و مدل باید در تمام x ها به صفر میل کند. با توجه به مثبت بودن تابع خطا، لازمه‌ی این امر به صفر میل کردن تمامی مقادیر خطا است. بنابراین $\sum_{j=1}^n \Delta S^j$ به عنوان سلول هدف در Excel وارد و توسط بخش Solver مقادیر سلول‌های مرجع (i و S_{\max}) آن قدر تغییر داده شد تا مقدار سلول هدف کمینه شود.

۵-۲- بررسی نتایج روش نیمه تجربی

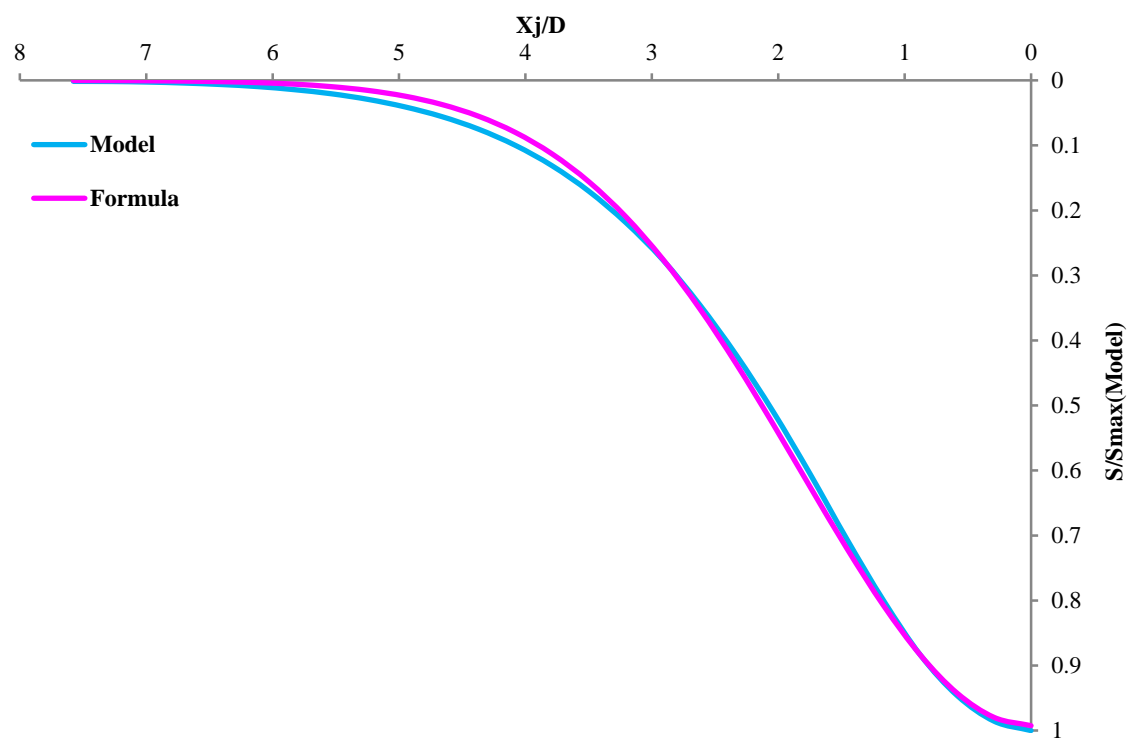
نتایج حاصل از روش نیمه تجربی معرفی شده برای تعیین پارامترهای گزاره‌ی پک و همچنین منحنی نشست حاصل از روش تجربی و عددی برای سه مقطع در ادامه تعیین و در نمودارهای موجود در شکل ۱۲، شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نشان



شکل ۱۲- تطابق گودی نشست روش نیمه تجربی با گودی نشست روش عددی: مقطع دور از جبهه‌کار



شکل ۱۳- تطابق گودی نشست روش نیمه تجربی با گودی نشست روش عددی: مقطع با نشست سطحی حداکثر



شکل ۱۴- تطابق گودی نشست روش نیمه تجربی با گودی نشست روش عددی: مقطع در بالای جبهه‌کار

دست آمده از روش نیمه‌تجربی در جدول ۴ مقایسه شده است. مقایسه‌ی نتایج روش‌ها نشان می‌دهد i به دست آمده از روش نیمه‌تجربی به نتایج بیش‌تر روش‌های موجود جدول ۳ نزدیک است. اگر در گزاره‌های پیشنهاد شده توسط پک و اتول مقدار $n=1.06$ قرار داده شود، برابری کامل بین نتایج به دست آمده از گزاره‌ها و روش نیمه‌تجربی حاصل خواهد شد. با توجه به توافق منحنی‌های حاصل از گزاره‌ی نیمه‌تجربی و مدل، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از روش نیمه‌تجربی ارایه شده، تقریب بسیار خوبی را از نشست در ناحیه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که در هر سه حالت پارامتر i یکسان است. این بدان معنی است که در گودی نشست پایدار مقدار فاکتور i در تمامی مقاطع ثابت و مستقل از فاصله‌ی جبهه‌کار از مقطع مورد نظر است. به طور کلی با پیشروی تونل از مقدار فاکتور i به تدریج کاسته شده و سرانجام به مقدار ثابت $1.82D$ می‌رسد. وابستگی فاکتور i به عمق برای ناحیه‌ی مورد مطالعه را می‌توان به صورت گزاره‌ی (۱۲) بیان نمود:

$$i = 0.54Z_0 \quad (12)$$

مقادیر پارامتر i حاصل از روش‌های تجربی با مقدار به

جدول ۴- مقایسه‌ی نتایج روش‌های تجربی با نتایج به دست آمده از روش نیمه‌تجربی برای تعیین فاکتور i

توضیحات	گزاره‌ی i	i	محقق
$n = 0.8 - 1.0$	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^n$	$8.74 < i < 11.15$	پک (۱۹۶۹)
-	$i = 0.25(1.5Z_0 + 0.5R)$	$i = 8.77 m$	اتکینسون و پاتس (۱۹۷۹)
-	$i = 0.43Z_0 + 1.1$	$i = 10.69 m$	اورایلی و نیو (۱۹۸۲)
-	$i = 0.5Z_0$	$i = 11.15 m$	میر (۱۹۸۳)
$\alpha = 1 \& n = 1$	$\frac{i}{R} = \alpha \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^n$	$i = 11.15 m$	اتول (۱۹۷۷)
$\alpha = 1 \& n = 0.8$	$\frac{i}{R} = \alpha \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^n$	$i = 8.74 m$	کلاف و اشمیت (۱۹۸۱)
-	$i = 0.0.386Z_0 + 2.84$	$i = 11.31 m$	اریگلو (۱۹۹۲)
-	-	$i = 12 m$	روش نیمه تجربی

حداکثر افزوده شده است. این افزایش به تدریج تا مقطع با نشست حداکثر (فاصله‌ی $3D$ پشت جبهه‌کار) ادامه یافته ولی از این فاصله به بعد با دور شدن از جبهه‌کار از مقدار نشست حداکثر در مقطع عرضی اندکی کاسته شده و سرانجام اندازه‌ی نشست به یک مقدار پایدار میل نموده است.

بررسی گودی نشست طولی در نزدیکی تاج تونل نشان داده است، بیش‌ترین جابجایی‌ها در هر نقطه‌ای از تاج تونل، پس از رسیدن TBM به آن نقطه ایجاد می‌شود. با مقایسه‌ی گودی‌های نشست طولی در سطح زمین و تاج تونل، در ناحیه‌ی مورد مطالعه، ۲۶ درصد نشست حداکثر ایجاد شده در تاج تونل به سطح زمین منتقل می‌شود. بر اساس نتایج مدل عددی بالازدگی سطح زمین در پشت سپر بررسی شده است.

یک روش نیمه‌تجربی نیز برای تطبیق گودی نشست

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اندرکنش حفاری تونل توسط ماشین EPB و خاک اطراف تونل با استفاده مدلسازی عددی سه‌بعدی بررسی و خصوصیات گودی نشست پایدار در اطراف تونل تعیین شده است. بر اساس نتایج به دست آمده حداکثر نشست سطحی در فاصله‌ای حدود ۳ برابر قطر تونل در پشت جبهه‌کار به وجود آمده است. همچنین نشست سطحی ایجاد شده در بالای جبهه‌کار برابر با ۴۴٫۵۸ درصد نشست ماکزیمم به دست آمده است. با مقایسه‌ی نشست در جبهه‌کار و محل نصب اولین نگهداری، نشست‌ی برابر با ۳۹٫۲۳ نشست حداکثر در امتداد سپر و ناحیه‌ی تزریق و مقدار ۱۶٫۱۹ درصد نشست ماکزیمم در امتداد حلقه‌ی نگهداری رخ داده است.

با حرکت از جبهه‌کار به سمت بخش‌های حفاری شده، از تغییرات پهنای گودی نشست کاسته ولی به مقدار نشست

حاصل از حل عددی با گزاره‌ی تجربی گودی نشست پک
 بیان و پارامترهای گودی نشست عرضی معرفی شده است. بر
 اساس نتایج حاصل از این روش، گزاره‌ی تجربی گودی
 نشست به صورت گزاره‌ی (۱۰) تعیین شده است.

۷- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
EI	kNm^2/m	سختی خمشی	S	m	نشست سطحی تئوری
EA	kN/m	سختی محوری	S_{max}	m	نشست سطحی حداکثر
θ	-	نسبت پواسون	γ	m	فاصله‌ی افقی عرضی از مرکز تونل
γ_{sat}	gr/cm^3	وزن مخصوص اشباع خاک	γ	ton/m^3	میانگین وزن مخصوص سازندها
γ_{dry}	gr/cm^3	وزن مخصوص خشک خاک	Z_0	m	عمق محور تونل
C	kg/cm^2	چسبندگی خاک	P_s	ton/m^2	فشار کل روباره
φ	$Degree$	زاویه‌ی اصطکاک داخلی	V_s	m	حجم گودی نشست (در طول تونل)
E	kg/cm^2	مدول کشسانی	ΔS^j	-	مقدار خطا
D	m	قطر تونل	n	-	تعداد نقاط
i	m	مختصات تغییر انحنای پروفیل گودی نشست یا فاکتور پهنای گودی نشست			
x_j	m	مختصات عرضی نقطه‌ی زردر منحنی توزیع نشست			
x_{Smax}	m	مختصات عرضی نشست حداکثر واقع در بالای محور تونل			
S^j_{Model}	m	نشست محاسبه شده توسط نرم‌افزار برای هر x_j			
$S^j_{Formula}$	m	نشست به دست آمده از گزاره‌ی پک برای هر x_j			

۸- منابع‌ها

- [1] O'Carroll, J. B. (2005). *A Guide to Planning, Constructing and Supervising Earth Pressure Balance TBM Tunneling*. New York: Parsons Brinckerhoff Inc.
- [2] Toan, N. D. (2006). *TBM and Lining Essential Interfaces*. Msc Thesis, Italy: Politecnico Di Torino. <http://ita-aites-srv1.epfl.ch/index.php?id=90&L=1>.
- [3] 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. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:9\(846\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:9(846)).
- [4] Park, K. H. (2005). Analytical Solution for Tunnelling-Induced Ground Movement in Clays. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(3), 249-261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2004.08.009>.
- [5] Leca, E. & Barry, N. (2007). Settlements Induced by Tunneling in Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(2), 119-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.11.001>.
- [6] Brinkgreve, R. B. J., & Broere, W. (2003). The Influence of Tunnel Boring on Foundations and Buildings in Urban Areas - A Numerical Study. Workshop on Geotechnics of Soft Soils (pp. 257-263). Delft University of Technology & Plaxis B.V. http://www.geo.citg.tudelft.nl/broere/pdf/brinkgreve_FEMtunnel_scnep2003.pdf.
- [7] Cheng, C. Y., Dasari, G. R., Leung, C. F., Chow, Y. K., & Rosser, H. B. (2004). 3D Numerical Study of Tunnel-Soil-Pile Interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(4-5), 381-382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2004.02.011>.

- [8] Xiang, Y., Jiang, Z., & He, H. (2008). Assessment and Control of Metro-Construction Induced Settlement of A Pile-Supported Urban Overpass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 300-307, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.06.008>.
- [۹] اسفندیاری، م. (۱۳۸۷). تحلیل نشست ناشی از حفر تونل مترو و تاثیر آن بر روی سازه‌های سطحی - مطالعه‌ی موردی: زیرگذر خیابان زند شیراز. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشکده‌ی فنی - مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [10] Al-Khoury, R., Bakker, K. J., Bonnier, P. G., Vermeer, P. A., & Waterman, D. (2004). *Tutorial Manual of Plaxis 3D Tunnel, Version 2*. Netherlands: Delft University of Technology & Plaxis B.V.
- [۱۱] مهندسان مشاور مکانیک خاک. (۱۳۸۶). گزارش آزمایشگاه مکانیک خاک و ژئوتکنیک مسیر قطار شهری شیراز.
- [12] Moller, S. C. (2006). *Tunnel Induced Settlement and Structural Forces in Lining*. Berlin: Doctoral Thesis, Institute of Geotechnic, Stuttgart University. ISBN-10: 3-9211837-54-5. http://www.uni-stuttgart.de/igs/content/publications/IGS_Dissertationen/Doctoral_Thesis_Sven_Moeller.pdf.
- [13] Mroueh, H., & Shahrour, I. (2008). A Simplified 3D Model for Tunnel Construction Using Tunnel Boring Machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(1), 38-45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.11.008>.
- [14] Namazi, E., Mohamad, H., Hong, A. K. B., Hajihassani, M., Josoh, S. N., & Alavi, S. V. (2012). Ground Behaviour around a Tunnel Using Various Soil Models. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(E), 609-622. <http://www.ejge.com/2012/Ppr12.056alr.pdf>.
- [15] Franzius, J. N., Potts, D. M., & Burland, J. B. (2005). The influence of Soil Anisotropy and K0 on Ground Surface Movements Resulting from Tunnel Excavation. *Géotechnique*, 55(3), 189-199. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2005.55.3.189>.
- [16] Ng, C. W. W., & Lee, G. T. K. (2005). Three-Dimensional Ground Settlements and Stress Transfer Mechanisms due to Open-Face Tunnelling. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4), 1015-1029. <http://dx.doi.org/10.1139/t05-025>.
- [17] Sweeney, P. (2006). *A Study of Interaction Effects due to Bored Tunnels in Clay*. Master's Thesis, Department of Civil and Environmental engineering, Massachusetts Institute of Technology. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/34585>.

Numerical Analysis of Longitudinal and Transverse Surface Settlement Induced by EPB Tunneling- A Case Study: Shiraz Subway Tunnels

R. Rahmnejad¹; M. Esfandiary²; E. Namazi³; H. Jamshidi⁴

1- Professor; Faculty of Engineering; Department of Mining; Shahid Bahonar University of Kerman

2- M.Sc. in Rock mechanics; Faculty of Engineering; Department of Mining; Shahid Bahonar University of Kerman

3- Ph.D. in Geotechnical Engineering; Expert; Golder Associates (Singapore)

4- Expert; EPB Control Center; Bamrah Construction Company (Shiraz)

Received: 14 Oct 2012; Accepted: 25 Aug 2013

Keywords

Surface settlement
Mechanized tunneling
Finite element
Peck's method
Empirical settlement assessment

Extended Abstract

A major concern about construction of tunnels is accurate prediction of ground displacement, which distorts and, in severe cases, damages surface structures. Empirical Peck's method is commonly used in many tunneling projects to predict surface settlements. Reasonable prediction by this method requires an appropriate estimation of settlement trough width (i). This

parameter can be obtained from previous case histories with similar ground conditions and excavations.

Introduction

A part of Shiraz subway system is constructed by twin tunnels using EPB machine. Due to the lack of relevant case histories, numerical simulations are used to predict i for the Shiraz tunnels. The longitudinal and transverse surface settlements obtained by numerical analyses are compared with those obtained from the empirical settlement method. Consequently, the maximum settlement and i are predicted for a part of Shiraz subway tunnels. The development of settlement profiles obtained by numerical modeling is also investigated in order to achieve the steady state condition behind the tunnel face.

Methodology and Approaches

The numerical simulations are performed using PLAXIS 3D Tunnel. The tunnel construction process has been varied out by systematic approach, in 35 phases. The empirical settlement method suggested by Peck has been used to predict the transverse settlement trough. The longitudinal and transverse settlements predicted by numerical modeling are also obtained during tunnel excavation. The development of settlements is studied to establish the steady state condition. The initial estimation of i is obtained by the current empirical equations. To achieve the appropriate trough width, the initial i is modified by comparison of settlement troughs obtained from empirical and numerical approaches.

Results and Conclusions

The numerical results have shown that the surface settlement directly above the tunnel face is around 45% of the maximum surface settlement. Small surface settlement has been induced after installation of the tunnel lining. The development of surface settlement profiles has indicated that the steady state condition is reached at three times of tunnel diameter beyond the tunnel face. Comparison of the transverse surface settlement troughs indicated that trough width parameter is 1.8 times of the tunnel diameter. The current value can be used for prediction of surface settlement trough induced by tunneling in the similar ground and excavation conditions as Shiraz subway tunnels.