

# تحلیل برگشتی داده‌های نشست‌سنجی در حین حفاری تونل در محیط‌های شهری (مطالعه موردی: خط ۶ متروی تهران)

کاوه آهنگری، دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران  
مسعود ظهیری، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران  
سید محمد منصورزاده\*، مربی، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران  
حامد عجم زاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسین مشاور AIC، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [m\\_mansoorzadeh@yahoo.com](mailto:m_mansoorzadeh@yahoo.com)

دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵

صفحه ۵۷-۷۹

## چکیده

پیش‌بینی و کنترل نشست در مناطق شهری هم از لحاظ ایمنی و هم از نقطه نظر اقتصادی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. مسیر خط ۶ متروی تهران از محدوده میدان کوهسار در انتهای خیابان کوهسار شمالی واقع در شمال غرب تهران آغاز می‌شود و نهایتاً در جنوب تهران به پایانه دولت آباد منتهی می‌گردد. بخش شمالی تونل خط ۶ مترو تهران بصورت سنتی با استفاده از روش NATM حفاری می‌شود. در جریان اجرای تونل خط ۶ متروی تهران سیستم ابزار دقیق و رفتارسنجی نسبتاً کاملی پیاده شده و داده‌های آن پردازش شده است. با توجه به اینکه اطلاعات ژئوتکنیکی با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و برجا به دست می‌آید و اکثراً موقعیت‌های انجام تست در مسیر پروژه دارای فاصله می‌باشد، ممکن است فاکتورهای مختلفی از قبیل ناهمگنی‌های موضعی در لایه‌های زیرین و یا تغییر خاک بین دو موقعیت مختلف بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی تاثیر گذار باشد. یکی از بهترین روش‌های ارزیابی این پارامترها در مقیاس توده زمین، انجام تحلیل برگشتی بر اساس نتایج ابزار دقیق است. در این مقاله با مدل‌سازی مراحل حفاری تونل با نرم‌افزار عددی اجزا محدود PLAXIS2D و انجام تحلیل برگشتی، به تخمین پارامترهای محتمل زمین پرداخته شده است. به منظور انجام این تحلیل، تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی، میزان آزادسازی تنش قبل از نصب سیستم نگهداری و مدول الاستیسیته خاک مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس آنالیز حساسیت انجام یافته مشاهده گردید که از بین پارامترهای ژئوتکنیکی، دو پارامتر مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی خاک دارای بیشترین تأثیر بر روی نشست سطح زمین می‌باشند. به طوریکه با تغییر زاویه اصطکاک داخلی از ۲۴ تا ۴۰ درجه میزان جابجایی‌ها از ۵۱/۳ تا ۱۴/۷ میلیمتر تغییر کرد. همچنین تغییر مدول الاستیسیته در بازه بین ۷۵ تا ۲۱۵ مگاپاسکال نیز باعث تغییر جابجایی بین ۲۳/۲ تا ۸ میلیمتر شد. لذا با تغییر این پارامترها در ۹ مقطع مختلف در مسیر تونل نشست‌های حاصل از مدل‌سازی عددی با نشست‌های ثبت شده به وسیله ابزار دقیق تدقیق شدند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته خاک با ضریب افزایشی ۱ الی ۲ در مدل‌سازی عددی نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد. زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز در محدوده ۳۷ تا ۴۰ درجه متغیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل برگشتی، تونل خط ۶ مترو تهران، رفتارسنجی، PLAXIS2D

## ۱- مقدمه

امروزه در شهرهای بزرگ، متروها و تونل‌های شهری به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین و مهم‌ترین زیرساخت‌های شبکه حمل و نقل شهری به شمار می‌آیند. هرچه محیط شهری شلوغ‌تر و فضای سطحی محدودتر شده، نیاز به ایجاد سازه‌های زیر سطحی مانند تونل‌ها برای تامین این زیرساخت‌ها بیشتر احساس می‌شود.

مسیر خط ۶ متروی شهری تهران از محدوده میدان کوهسار در انتهای خیابان کوهسار شمالی واقع در شمال غرب تهران آغاز می‌شود و در ادامه مسیر خود پس از گذر از زیر خیابان کوهسار و به موازات آن از زیر بزرگراه‌های همت و حکیم عبور نموده و به سمت مرکز شهر ادامه می‌یابد و نهایتاً در جنوب تهران به پایانه دولت آباد منتهی می‌گردد.

بخش شمالی تونل مذکور، با استفاده از روش NATM حفاری می‌شود. روباره تونل در این محدوده از ۹ تا ۲۴ متر تغییر می‌کند. در طی اجرای این تونل سیستم ابزار دقیق نسبتاً کاملی شامل بین‌های نشست‌سنجی، همگرایی‌سنجی، نشست‌سنج‌های عمقی و انحراف‌سنج پیاده شده و اطلاعات ارزشمندی از رفتار توده خاک به دست آمد. در این مقاله داده‌های به دست آمده از بین‌های نشست‌سنجی برای تدقیق پارامترهای ژئوتکنیکی توده خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

تاکنون مطالعات زیادی در مورد تحلیل برگشتی<sup>۱</sup> داده‌های ژئوتکنیکی انجام شده که از آن جمله می‌توان به مطالعات میراندا و همکاران (Miranda et al., 2011)، موریرا و همکاران (Moreira et al., 2013)، هشاش و همکاران (Hashash et al., 2010)، ژائو و همکاران (Chenyang et al., 2015)، Zhao et al., 2015، اسدالله پور و همکارانش (Asadollahpour et al., 2014)، میرو و همکاران (Miro et al., 2015)، ژانین و همکاران (Janin et al., 2015) و شریف زاده و همکاران (Sharifzadeh et al., 2012) اشاره نمود.

میراندا و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود تحلیل برگشتی داده‌های ژئومکانیکی را به منظور بهینه سازی مدل‌های سه بعدی ساخته شده از یک مغار در پرتغال انجام دادند. بدین منظور دو روش بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفت که یکی شامل الگوریتم بهینه سازی کلاسیک و دیگری الگوریتم بهینه سازی پویا بود.

در فرآیند بهینه سازی، جابجایی‌های اندازه گیری شده توسط اکستنسومتر در حین حفاری برای شناسایی پارامترهای سنگ از جمله مدول تغییرشکل (E) و نسبت تنش افقی ( $K_0$ ) مورد استفاده قرار گرفت.

سپس کارایی هر دو الگوریتم بررسی و باهم مقایسه گردید. هر دو روش فوق، پارامترهای توده سنگ را تخمین زده و دیدگاه مناسبی در مورد خصوصیات سنگها ارائه دادند.

هدف از مطالعات موریرا و همکاران (۲۰۱۳) ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه سازی در تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی در سازه‌های زیرزمینی بود. این تحلیل با مطالعه پارامتریک یک تونل در حال ساخت انجام شد.

برای بررسی کارایی الگوریتم، ترکیب مختلف پارامترها و داده‌های حاصل از اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گرفت. به منظور داشتن یک مبنای مقایسه‌ای سه الگوریتم بهینه سازی کلاسیک مورد استفاده قرار گرفت.

همانطور که پیشتر بیان گردید رفتارنگاری در پروژه‌های ژئوتکنیکی فرآیندی مهم در طراحی و اجرای آنها می‌باشد. در پروژه‌های شهری، روش‌های عددی و تجربی برای تخمین پتانسیل تغییرشکلها و تأثیر آنها بر روی سازه‌های سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هشاش و همکاران (۲۰۱۰) دو روش تحلیل برگشتی را ارائه و در یک پروژه حفاری زیرزمینی در شیکاگو مقایسه کردند.

استفاده از این دو روش نتایج مناسبی را در مورد جابجایی دیواره و ماکزیمم نشست سطحی ارائه داد. روش الگوریتم ژنتیک نشست سطحی را در قسمت بیرون محدوده حفاری بیشتر تخمین می‌زد که این پدیده به دلیل مدل رفتاری مورد استفاده (یعنی مدل خاک سخت شونده<sup>۲</sup>) بود.

بنابراین بر اساس کمترین پارامترهای مقاومتی به دست آمده از تحلیل برگشتی سه نوع روش حفاری در این تونل پیشنهاد شد.

## ۲- وضعیت ژئوتکنیکی زمین در مسیر تونل

مطالعات ژئوتکنیک نشان می‌دهد براساس طبقه بندی متحد<sup>۳</sup>، خاکهای در برگیرنده تونل عمدتاً از نوع GC، GM، SC و SM می‌باشد این نمادها نشان‌دهنده آن است که بخش درشت دانه خاک بیشتر از ماسه و شن و بخش ریزدانه آن از رس و سیلت می‌باشد. در بین این خاکها، لزه‌های متشکل از رس ماسه دار (CL) یا شن بد دانه بندی شده (GP) و غیره نیز دیده می‌شود. نهشته‌های آبرفتی این بخش از مسیر مترو به چند واحد زمین شناسی مهندسی با دیدگاه تونلسازی تفکیک شده است:

- ✓ واحد زمین شناسی مهندسی GC و SC
  - ✓ واحد زمین شناسی مهندسی GM و SM
  - ✓ واحد زمین شناسی مهندسی CL
  - ✓ واحد زمین شناسی مهندسی GC-GM و SC-SM
- کیلومتر از شروع و پایان هر ناحیه به همراه واحدهای تشکیل دهنده آن در جدول ۱ ارایه شده است.

ژائو و همکاران (۲۰۱۵) از روش اجزا محدود برای مدلسازی دو بعدی و سه بعدی تونل مکانیزه در وست شلد در هلند استفاده نمودند. در این مطالعه ضمن به کارگیری مدل رفتاری خاک سخت شونده، با آنالیز حساسیت و تخمین پارامترها، کالیبراسیون مدل انجام شد. در این مقاله آنالیز حساسیت نسبت به هر کدام از پارامترها انجام شده و سپس با استفاده از تحلیل برگشتی مقادیر هر کدام از پارامترها تدقیق گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که پارامترهای تدقیق شده با استفاده از تحلیل برگشتی به تخمین مناسب نشست با استفاده از مدلسازی عددی کمک می‌نماید. ژانین و همکاران (۲۰۱۵) آنالیز برگشتی عددی را در مقاطع مونتورینگ تونل تالون در فرانسه انجام دادند. هدف اصلی در این مطالعه ارزیابی و مقایسه روش دو بعدی و سه بعدی در تخمین رفتار واقعی و برجای توده سنگ بود. در این مطالعه با مدلسازی سه بعدی، تخمین مناسبی از رفتار توده سنگ بر اساس داده‌های برجای ثبت شده حاصل گردید. همچنین با اعمال شرایط سه بعدی در مدل‌های دوبعدی (آزادسازی تنش بر اساس فرآیند واقعی حفاری) نتایج مناسبی به دست آمد. شریف‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) نیز به بررسی تونل شیپلی در آزادراه تبریز-زنجان پرداختند. آنها با انجام تحلیل برگشتی مشاهده کردند که جابجایی سقف در زون‌های ریزشی بین ۷۰ تا ۷۵ میلیمتر می‌باشد.

جدول ۱. وضعیت زمین شناسی جبهه کار و تاق تونل در کیلومترهای مختلف

لايه های خاک		تا كيلومتر	از كيلومتر	ردیف	لايه های خك		تا كيلومتر	از كيلومتر	ردیف
GC,GC-GM	تاق تونل	۲۸+۵۴۰	۲۸+۰۶۰	۷	GC-GM,SC-SM	تاق تونل	۲۴+۵۰۰	۲۳+۱۱۵	۱
GC,SC-SM,GC-GM	جبهه کار				GC-GM,SC-SM	جبهه کار			
GC-GM,GC,SC-SM	تاق تونل	۲۹+۰۰۰	۲۸+۵۴۰	۸	SC-SM, GC-GM	تاق تونل	۲۵+۶۶۰	۲۴+۵۰۰	۲
GC-GM,GC,SC-SM	جبهه کار				GC-GM,SC-SM,GW	جبهه کار			
SC-SM	تاق تونل	۳۰+۵۲۰	۲۹+۰۰۰	۹	GC-GM	تاق تونل	۲۶+۱۸۰	۲۵+۶۶۰	۳
SC-SM,GC-GM,SC	جبهه کار				GC-GM,SC	جبهه کار			
SC-SM	تاق تونل	۳۰+۹۲۰	۳۰+۵۲۰	۱۰	SC,SC-SM,CL	تاق تونل	۲۶+۸۲۰	۲۶+۱۸۰	۴
SC-SM,SC,CL-ML	جبهه کار				SC-SM,CL,SC,GC	جبهه کار			
GC-GM,SC-SM	تاق تونل	۳۱+۵۰۰	۳۰+۹۲۰	۱۱	GC-GM,GC	تاق تونل	۲۷+۵۴۰	۲۶+۸۲۰	۵
SC-SM,GC,CL-ML,SC	جبهه کار				GC-GM,CL-ML,SC,SC-SM	جبهه کار			
					SC-SM	تاق تونل	۲۸+۰۶۰	۲۷+۵۴۰	۶
					SC,SC-SM,GC-GM	جبهه کار			

### ۳- ابزار بندی

با استفاده از اطلاعات حاصل از ابزاربندی و رفتارنگاری، می‌توان به رفتار زمین و سازه‌های سطحی و زیرسطحی موجود، در اثر حفر تونل پی برد. این امر در مورد پروژه‌های شهری با توجه به پیچیدگی‌های محیطی، اهمیت خاصی دارد. به کمک ابزاردقیق، کلیه عوامل مؤثر در طراحی، احداث و ایمنی فضاهای زیرزمینی تحت کنترل قرار می‌گیرد تا ضمن پیش‌گیری از بروز خطرات احتمالی، در صورت لزوم تغییراتی نیز در طرح اولیه ایجاد شود؛ به عبارت دیگر رفتار زمین با تمام خصوصیات شناخته‌شده و ناشناخته در محل، مکمل و تصحیح‌کننده طراحی نظری است. با این مقدمه، بحث ابزاربندی، جزء لاینفک پروژه‌های شهری است، به طوری که اختصاص نیم درصد تا یک درصد هزینه‌های پروژه به این امر، توجیه‌پذیر می‌باشد.

با توجه به حساسیت حفاری تونل در محیط‌های شهری، در تمامی مسیر خط ۶ ابزارهای نشست سنجی قبل از رسیدن سینه کار تونل به مقطع مورد نظر نصب شده است. قرائت نشست و تغییر شکل‌های زمین به صورت مستمر در تمامی ابزارهای نصب شده انجام می‌شود.

نمونه‌ای از مراحل نصب ابزار برای پین‌های نشست‌سنجی در شکل ۱ نشان داده شده است که بر اساس نشریه ۶۹۵ "راهنمای عملیات ابزاربندی و رفتارنگاری در تونلسازی مکانیزه شهری" می‌باشد. قابل ذکر است که قرائت‌ها با دوربین ترازیابی با دقت ۰/۷ میلیمتر انجام شده است.

در حالت عادی نشست زمین در دو مرحله مورد بررسی قرار می‌گیرد، یکی نشست سطحی کوتاه مدت که مستقیماً به واسطه حفاری تونل ایجاد می‌شود و بیشترین و بحرانی‌ترین بخش نشست بوده و به عنوان حجم از دست رفته<sup>۴</sup> تعریف می‌گردد و دومین مرحله‌ی نشست، مربوط به نشست تحکیمی می‌باشد که در بلند مدت به وقوع می‌پیوندد.

نشست کوتاه مدت در زمان حفاری تونل، به دلایلی همچون جابجایی سینه کار تونل (حین حفاری) و دیواره تونل قبل از نصب سیستم نگهداری اولیه و باقی ماندن فضای خالی در پشت سیستم نگهداری روی می‌دهد. این مرحله از نشست به سبب مقدار قابل توجه آن نسبت به نشست تحکیمی به عنوان عامل اصلی ریسک آسیب به ساختمان‌ها و تأسیسات سطحی و زیرسطحی محسوب شده و لذا دارای اهمیت خاصی می‌باشد.

با ترازیابی می‌توان نشست و بالادگی سطح زمین را اندازه‌گیری نمود. این عملیات بدین صورت انجام می‌گیرد که با ایجاد نقاط مشخصه بر روی زمین و قرائت مستمر آنها پیش از رسیدن و پس از عبور تونل از این نقاط، مقدار جابجایی عمودی آنها و در نتیجه میزان نشست سطح در اثر حفر تونل مشخص می‌گردد. به دلیل اینکه سطح زمین در محیط‌های شهری از سنگفرش یا آسفالت پوشیده شده است و این بخش خود دارای یک مقاومت ساختاری است، جهت ثبت رفتار زمین و نشست‌های احتمالی، نقاط نشانه باید در زیر سطح قرار گیرند تا از بروز خطا جلوگیری شود.

### ۴- نشست سطحی

تغییر وضعیت تنش در محیط اطراف تونل به واسطه حفاری آن، عامل جابجایی‌های سطحی زمین است. مقدار جابجایی و نشست که به واسطه حفاری تونل به سطح زمین می‌رسد، به وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی زمین اطراف تونل، معارضین و سازه‌های سطحی و زیرسطحی، حفرات، هندسه تونل و عمق قرارگیری آن و همچنین نحوه اجرای تونل بستگی دارد.

### ۴-۱- مقدار نشست و جابجایی‌های ثبت شده در

#### عملیات رفتارنگاری

نشست سنجی سطح زمین در مسیر تونل با استفاده از نصب پین‌های نشست سنجی و اهداف ترازیابی که بر روی ساختمان‌ها نصب می‌شود، انجام می‌پذیرد. فواصل ابزارها به حساسیت محل و وجود یا عدم وجود ساختمان‌ها و سایر تأسیسات بر روی تونل بستگی دارد. اما در حالت عادی و در مسیری که تونل از زیر خیابان عبور می‌کند، فاصله مقاطع رفتارنگاری معادل ۱۵ متر در نظر گرفته شده است.

i: پارامتر عرض که در آن k یک ثابت بی بعد وابسته به نوع خاک است و z<sub>0</sub> عمق محور تونل است. بازه تأثیر نشست بر اساس این پارامتر و به میزان 2-5i ت عریف شده است.

با توجه به شکل ۲ محدوده تأثیر نشست حاصل از حفاری تونل در فاصله معادل 3i از محور تونل خواهد بود که با استفاده از منحنی عرضی نشست قابل محاسبه می‌باشد. با توجه به اینکه اطلاعات ژئوتکنیکی با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و برجا به دست می‌آید و اکثراً موقعیت‌های انجام تست در مسیر پروژه دارای فاصله می‌باشد، ممکن است فاکتورهای مختلفی از قبیل ناهمگنی‌های موضعی در لایه‌های زیرین و یا تغییر خاک بین دو موقعیت مختلف بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی تأثیر گذار باشد. به همین منظور در پروژه‌های مختلف تحلیل برگشتی جهت تدقیق پارامترهای ژئوتکنیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۴-۳- برآورد حوزه تأثیر نشست در محدوده مورد بررسی با توجه به نتایج رفتارنگاری

با توجه به رابطه (۱) و با مد نظر قرار دادن حداکثر جابجایی ثبت شده (نشست بین محوری) در عملیات ترازایی به عنوان S<sub>max</sub>، مقدار نشست ثبت شده در هر کدام از پین‌های ترازایی سمت چپ و راست تونل به عنوان S و فاصله هر کدام از پین‌ها از محور تونل به عنوان y، امکان محاسبه مقدار i از فرمول فوق در طرفین تونل میسر می‌شود. پس از این مرحله و با روش سعی و خطا با استفاده از مقدار i محاسبه شده و با در نظر گرفتن نشست بین محوری (که با فاصله کمی از محور تونل نصب شده است) به عنوان S، مقدار S<sub>max</sub> واقعی و در نهایت i نهایی دو سمت محور تونل محاسبه می‌شود. نتایج محاسبه S<sub>max</sub> و i برای مقاطع مورد بررسی در جدول ۲ و نمودار نشست این مقاطع در ادامه شکل ۳ نشان داده شده است.

با ثبت متوالی مقادیر نشست‌های قرائت شده از ابزار دقیق نصب شده در طول مسیر تونل، امکان ارزیابی از نشست‌های سطحی میسر می‌شود و این موضوع اهمیت خاصی در پروژه دارد، بطوریکه در اکثر موارد سایر موضوعات اجرایی تونل تحت کنترل این ارزیابی‌ها قرار می‌گیرد. نکته قابل ذکر این است که جابجایی ناشی از حفاری تونل تا حدی اجتناب ناپذیر می‌باشد و این جابجایی‌ها تا شعاعی از اطراف تونل را در بر خواهد گرفت. بدیهی است که مناسب بودن عملیات حفاری تونل، با جلوگیری از افزایش S<sub>max</sub> موجب کاهش شعاع تأثیر جابجایی‌های سطحی نیز می‌شود. بر اساس بررسی‌های به عمل آمده از نشست‌های بلند مدت، زمان اتمام نشست‌های کوتاه‌مدت (شروع نشست‌های بلند مدت) ۳ تا ۱۰ روز پس از عبور سینه کار از محل مورد بررسی می‌باشد. در شکل ۱ مراحل نصب بین نشست‌سنجی نشان داده شده است.

#### ۴-۲- تحلیل نتایج رفتارنگاری

همانطور که قبلاً بیان شد، حفاری تونل موجب جابجایی زمین تا شعاعی از محیط اطراف آن می‌شود. محدوده تحت تأثیر حفاری به جنس خاک، شرایط زمین شناسی، روباره تونل و کیفیت اجرای تونل بستگی دارد. معادله عمومی نشست که برای محاسبه نشست ناشی از حفاری تونل در مقطع عرضی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد به شکل زیر است:

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

$$S_{max} = \frac{V_L}{i \cdot \sqrt{2\pi}}$$

$$i = kz_0$$

(۲ و ۳)

که در این روابط

S: نشست سطحی در یک نقطه با موقعیت (x,y)

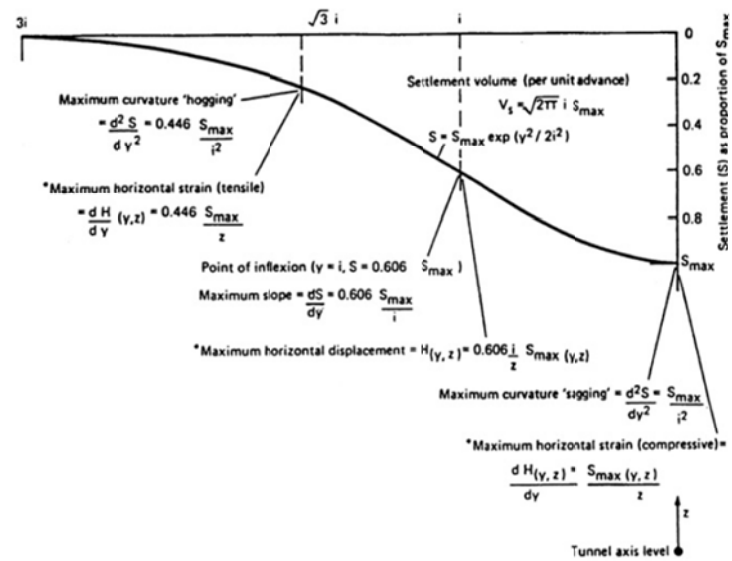
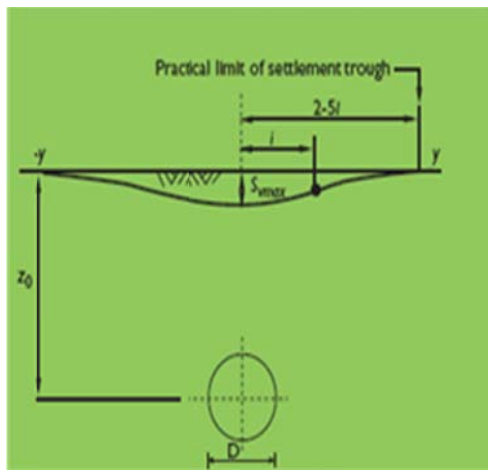
S<sub>max</sub>: نشست سطحی ماکزیمم در یک مقطع عمود بر محور تونل

y: فاصله نقطه مورد نظر از محور تونل (متر)

V<sub>L</sub>: حجم از دست رفته



شکل ۱. مراحل نصب پین نشست سنجی



شکل ۲. شکل عمومی نشست سطحی زمین در مقطع عرضی

جدول ۲. پارامترهای نشست مقاطع مورد بررسی

پارامترهای نشست		فاصله ابزار نصب شده از محور تونل (متر)			نشست ثبت شده در ابزارهای نشست سنجی (میلی متر)			کیلومتر نصب ابزار	ردیف
i	Smax	چپ	مرکز	راست	چپ	مرکز	راست		
۹/۵	۱۲/۲	۸/۷	۰/۷	۶/۲	-۱۱/۱	-۱۲/۱	-۹/۸	۳۱+۰۹۰	۱
۲۰/۹	۱۲/۱								
۵/۲	۱۵/۵۸	۱۴/۶	۳/۷	۶/۲	-۳/۵	-۱۲/۱	-۷/۶	۳۰+۵۱۰	۲
۱۰/۶	۹								
۱۵/۵	۱۵/۷۳	۴	۵/۴	۱۵/۹	-۱۴/۷	-۱۴/۸	-۹/۳	۳۰+۲۳۰	۳
۱۶/۱	۱۵/۱۶								
۹/۵	۶/۵	۵/۳	۶/۲	۱۳/۲	-۸/۷	-۵/۳	-۲/۵	۲۹+۵۸۵	۴
۷/۶	۱۱/۲								
۷	۸/۷	۱۱/۸	۴/۲	۴/۳	-۷/۳	-۱۰/۳	-۲/۱	۲۸+۷۶۰	۵
۶/۲	۱۲/۸								
۵/۲	۱۱	۴/۴	۰	۴/۴	-۸/۵	-۱۱	-۷/۷	۲۸+۲۷۰	۶
۶/۱	۱۱								
۹/۹	۱۲/۱	۱۲/۴	۰	۱۲/۴	-۵/۵	-۱۲/۱۱	-۵/۳۴	۲۶+۶۵۵	۷
۴/۴	۱۳	۸/۴	-	۴/۵	-۲/۱۳	-	-۷/۷	۲۴+۳۷۵	۸
۶/۷	۸/۵۶	۶/۵	۰	۴/۸	-۷/۳۷	-۸/۵۶	-۶/۶	۲۳+۶۰۸	۹
۱۱/۹	۸/۵۶								
۵/۲	۱۷	۴/۷۸	-	-۵/۹۷	-۱۱/۲۶	-	-۸/۸	۲۳+۵۲۸	۱۰

## ۵- فرایند مدل‌سازی

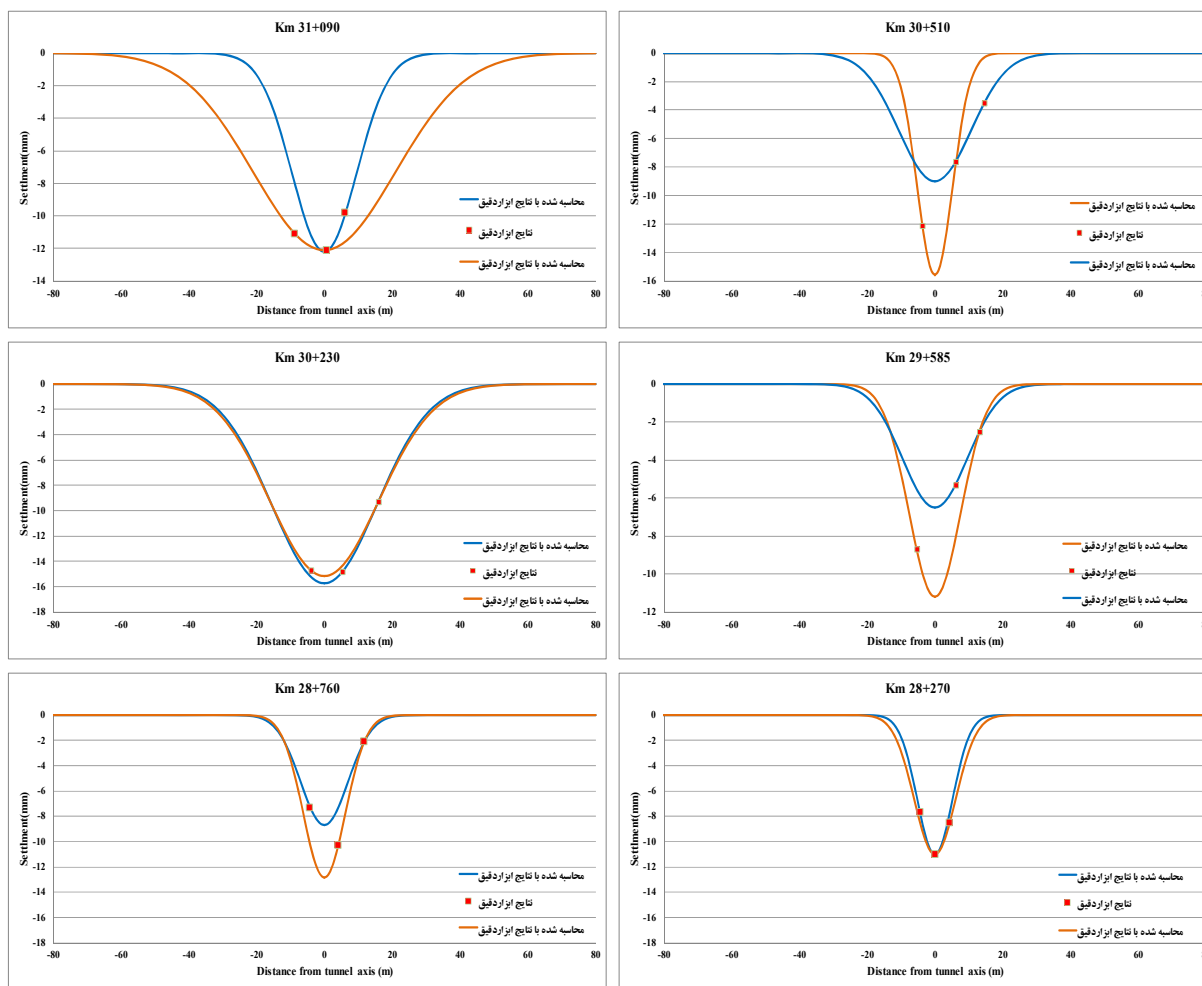
مدلسازی تونل با استفاده از روشهای عددی و به وسیله نرم افزار اجزا محدود Plaxis 2D ver.8.5 انجام شده است. با توجه به اینکه سیستم نگهداری تونل شاتکریت به همراه لئیس می‌باشد، لذا سازه نگهبان به صورت ترک خورده در نظر گرفته می‌شود. ضرایب ترک خوردگی بر اساس آیین نامه به صورت  $I_{column}=0.7I_g$  و  $I_{beam}=0.35I_g$  در نظر گرفته شده است. معیار تعیین عملکرد تیری یا ستونی اعضا، نیروی محوری است. به این ترتیب که اگر این نیرو بیشتر از  $0.1F_c$  باشد ستون و در غیر این صورت تیر فرض می‌شود.

به منظور کنترل میزان آزادسازی تنش در خاک از روش موسوم به  $\beta$  که از روش‌های معتبر مدل‌سازی دو بعدی تونل‌های NATM می‌باشد، استفاده شده است. در این روش، مفهوم آزادسازی تنش ناشی از نصب با تأخیر پوشش و تقسیم بار بین زمین و پوشش تونل، به خوبی مدل می‌شود. در این روش بخشی از تنش‌های اولیه یعنی  $(1-\beta)\sigma_0$  به تونل حفاظت نشده وارد می‌شود و بخش دیگر یعنی  $\beta\sigma_0$  به تونل با پوشش اولیه اعمال می‌گردد. پیاده‌سازی روش بتا در نرم افزار Plaxis با استفاده از گزینه ساخت مرحله‌ای انجام می‌پذیرد که در آن پارامتر  $\sum Mstage$  نهایی در مرحله غیر فعال بودن پوشش، به مقدار  $1-\beta$  محدود می‌شود. به این معنا که تنها بخشی از بارگذاری ناشی از حفاری تونل در این مرحله آزاد می‌شود و بقیه بارگذاری پس از فعال نمودن پوشش اولیه اعمال می‌گردد.

باودن دیستیل (Baudendistel, 1979)) با مدل‌سازی سه‌بعدی تونل و محاسبه تغییر شکل قائم سطح به محاسبه آزادسازی تنش پرداخته است. بر اساس این مدل‌سازی‌ها مقدار آزادسازی تنش برای تونل با مقطع نعل اسبی و با حفاری یک مرحله‌ای متناسب با گام حفاری تعیین شده است. در جدول ۳ روش تقریبی برای تخمین  $\beta$  بر اساس قطر معادل تونل و طول گام حفاری در تونل با حفاری تمام مقطع نعل اسبی و بر اساس مطالعات باودن دیستیل ارایه شده است.

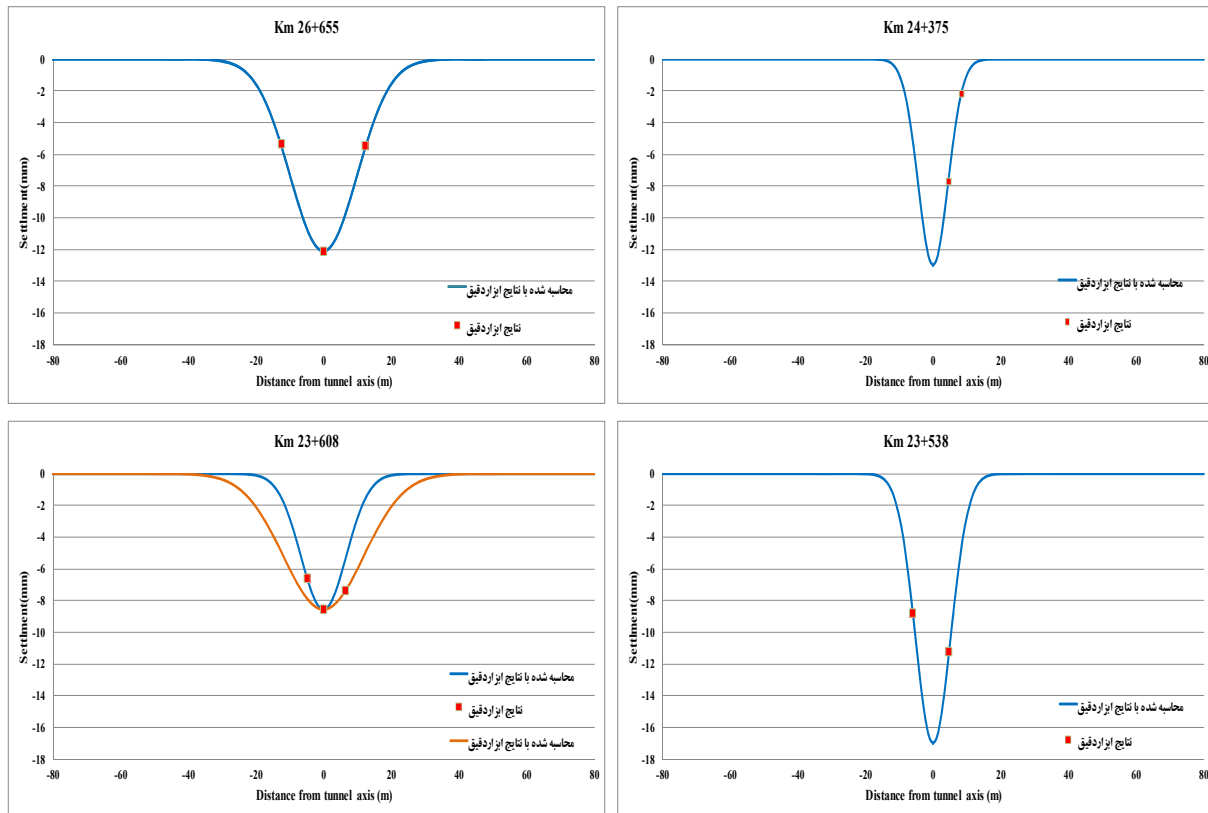
ضریب  $\beta$  کمتر متناظر با طول گام حفاری بیشتر و یا نصب دیرهنگام‌تر پوشش تونل می‌باشد و برعکس ضریب  $\beta$  بیشتر منجر به تغییر شکل‌های کمتر زمین و ایجاد نیروهای بیشتر در پوشش تونل می‌شود. اگر از مقادیر ضریب کاهش تنش مناسبی استفاده شود روش کاهش تنش منجر به نیروهای سازه‌ای و نشست منطقی، با دقت نسبی خوبی خواهد شد.

برای تخمین پارامتر  $\beta$  کارهای مطالعاتی زیادی انجام شده است. این پارامتر مشخصاً به طول گام حفاری وابسته است. علاوه بر آن پارامترهای دیگری نظیر وضعیت ژئوتکنیکی زمین، وضعیت هندسی مقطع و مراحل ساخت تونل بر این پارامتر تأثیر گذارند.



شکل ۳. منحنی نشست مقاطع مورد بررسی بر اساس داده‌های رفتارنگاری





ادامه شکل ۳. منحنی نشست مقاطع مورد بررسی بر اساس داده‌های رفتارنگاری

جدول ۳. مقادیر پیشنهادی باو دندسل برای پارامتر  $\beta$  در تونل‌های با حفاری تمام مقطع نعل اسبی

$d$	1.5. D	D	0.5.D	0.25.D	0.125.D	0
$\beta$	0.0	0.02	0.11	0.23	0.41	0.72

$d$ = Round Length

$\beta$ = unloading factor

D= excavation diameter

$$\lambda(x) = 0.25 + 0.75 \times \left[ 1 - \left( \frac{0.75}{0.75 + \frac{x}{R}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

در این رابطه  $x$  فاصله از سینه کار و  $R$  شعاع تونل می‌باشد. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از این روش‌ها و با توجه به گام پیشروی و ابعاد حفاری مقدار پارامتر  $\Sigma Mstage$  برای هر مقطع در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامتر  $\Sigma Mstage$  برای گامهای حفاری مختلف استفاده شده در این مقاله در جدول ۴ آمده است.

همچنین در برخی روابط به جای ضریب کاهش بار  $\beta$  از ضریب کاهش همجواری  $\lambda$  استفاده شده است. رابطه بین این دو ضریب به صورت زیر است:

$$\lambda = 1 - \beta \quad (6)$$

رابطه تحلیلی زیر برای محاسبه ضریب کاهش همجواری در تونل‌های دایره‌ای با مقطع دایره‌ای و رفتار الاستیک خاک توسط Panet ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر  $\sum Mstage$  استفاده شده در مدلسازی

گام حفاری	$\sum Mstage$
۱	۰/۵۳۲
۰/۷۵	۰/۴۷۹
۰/۵	۰/۴۱۶
۰/۴	۰/۳۹۳

## ۶- تحلیل برگشتی در مقاطع مورد بررسی

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مسیر پروژه، مقاطع ذکر شده در بالا در کیلومترهای مختلف انتخاب و مدلسازی تونل با استفاده از پارامترهای به دست آمده از مطالعات ژئوتکنیک انجام شد. سپس با استفاده از تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی میزان نشست در سطح زمین با مقادیر به دست آمده از ابزار دقیق، تدقیق شد.

### ۶-۱- تاثیر پارامترهای مختلف بر روی میزان نشست

به منظور انجام تحلیل برگشتی بر روی نتایج ابزار دقیق، ابتدا باید دیدگاه مناسبی بر روی پارامترهای تاثیر گذار بر روی نشست به دست آورد. به این منظور ابتدا تاثیر پارامترهای ژئوتکنیکی شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقدار مدول الاستیسیته بر روی نشست مورد بررسی قرار گرفتند و مقادیر این پارامترها در بازه‌های منطقی تغییر و نشست در سطح زمین اندازه گیری شد. در شکل های ۴، ۵ و ۶ تغییرات نشست زمین در اثر تغییر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود تغییرات چسبندگی خاک تاثیر بسیار اندکی بر روی نشست‌های بوجود آمده دارد. لذا، تاثیر این پارامتر در آنالیز برگشتی انجام شده در مقاطع مختلف نادیده گرفته شده است.

در شکل ۵ نیز تاثیر زاویه اصطکاک داخلی در بازه ۲۸ تا ۴۰ درجه بر روی نشست‌های سطحی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود زاویه اصطکاک داخلی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی نشست‌های سطحی داشته و با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، مقادیر نشست‌های سطحی کاهش پیدا می‌کند.

### ۵-۱- مراحل مدلسازی عددی

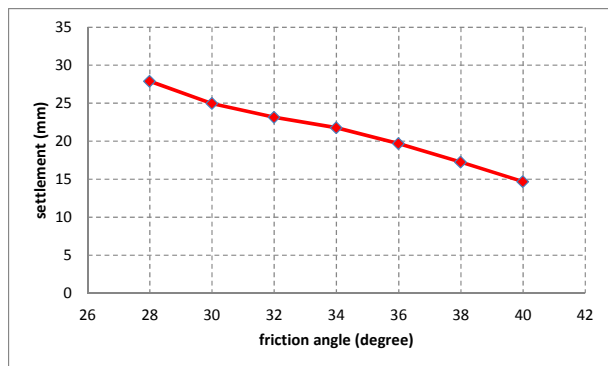
فاز صفر- ایجاد شرایط اولیه: اولین مرحله از مدلسازی ایجاد شرایط اولیه برای تحلیل تنش‌های برجای خاک می‌باشد. در این مرحله زمین دست نخورده بوده و تنها شرایط آب زیرزمینی در آن لحاظ می‌شود.

فاز یک - بارگذاری سازه‌های روزمینی: در ابتدای این فاز ابتدا تغییر شکل زمین ناشی از تنش‌های اولیه نوسازی می‌شود. پس از آن بارگذاری ناشی از عبور تونل از زیر سازه‌های روزمینی در مدلسازی در نظر گرفته می‌شود.

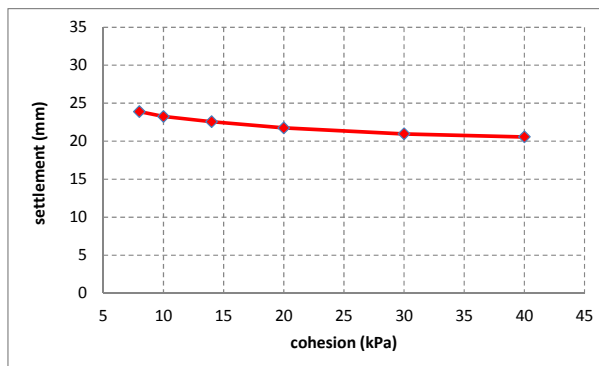
فاز دو - حفاری بخش فوقانی و آزادسازی تنش‌ها: در ابتدای این فاز همانند فاز اول تغییر شکل‌های زمین ناشی از بارگذاری سازه‌های روزمینی نوسازی می‌گردد، در این فاز آزادسازی تنش در خاک اطراف تونل پس از حفاری بخش فوقانی مقطع مدلسازی می‌شود.

فاز سوم - نصب پوشش موقت بخش فوقانی: پس از حفاری قسمت فوقانی و آزادسازی تنش محیط اطراف تونل در این مرحله سیستم نگهداری موقت تونل در بخش فوقانی مقطع نصب می‌گردد.

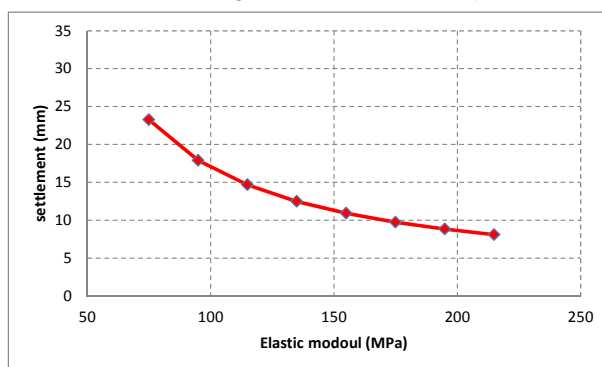
فاز چهارم - حفاری بخش تحتانی و تکمیل پوشش موقت تونل: در این مرحله باقیمانده مقطع در بخش پایین نیز حفاری شده و پوشش موقت این قسمت نصب می‌گردد. به این ترتیب پوشش موقت تونل تکمیل می‌گردد.



شکل ۵. تغییرات نشست زمین در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۴. تغییرات نشست زمین در اثر تغییر چسبندگی



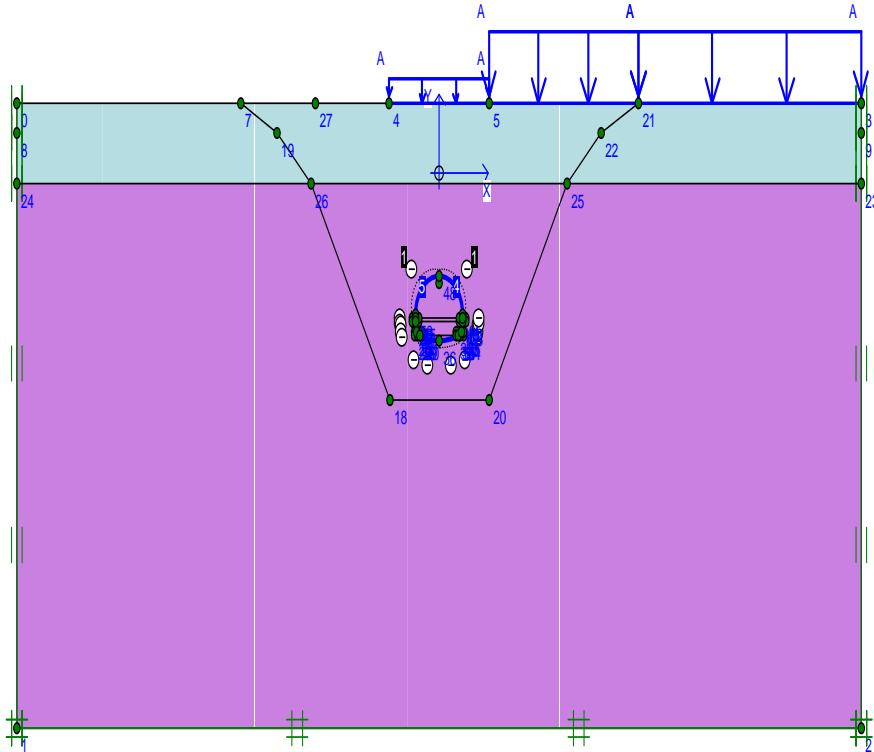
شکل ۶. تغییرات نشست زمین در اثر تغییر مدول الاستیسیته

## ۲-۶- مقادیر نشست در کیلومتراژ ۳۱+۰۹۰

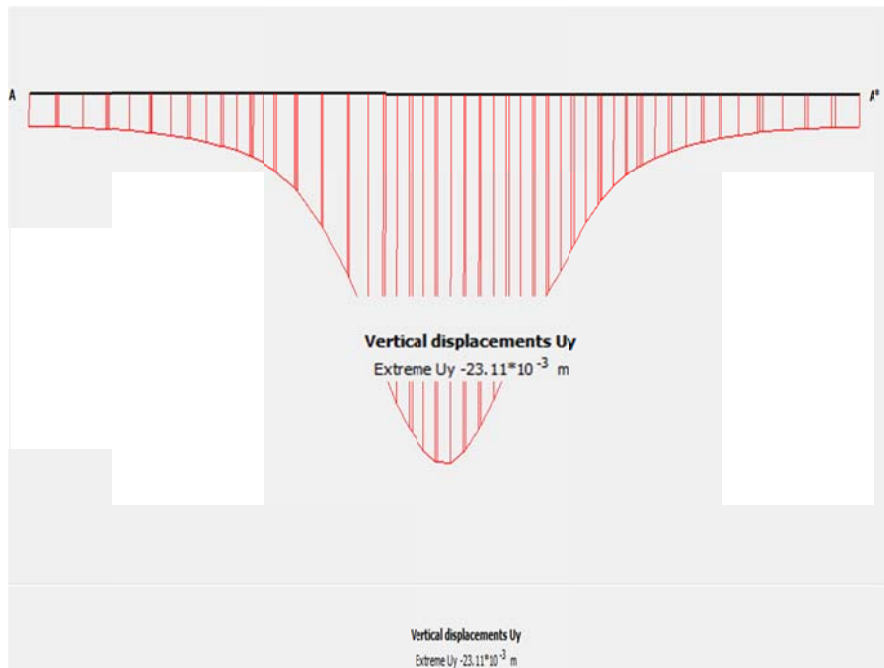
در این مقطع سه ابزار با فواصل نشان داده شده در جدول ۲ از محور تونل نصب شده است. در سمت چپ این مقطع ساختمانی ۶ طبقه قرار گرفته است. در شکل ۷ هندسه مدل در این مقطع که با استفاده از نرم افزار PLAXIS2D ساخته شده، نشان داده شده است. ارتفاع روباره در این مقطع برابر ۲۱/۲۵ متر می باشد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود بار ناشی از ترافیک به مقدار ۲۰ کیلونیوتن بر مترمربع و بار ساختمان به مقدار ۶۰ کیلونیوتن بر مترمربع بر روی مدل اعمال شده است. بر اساس مدل ساخته شده با استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی مقدار ماکزیمم نشست در سطح زمین برابر ۲۳/۱۱ میلیمتر بدست می آید (شکل ۹).

در شکل ۶ نیز تاثیر مدول الاستیسیته بر روی نشست سطح زمین نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش مدول الاستیسیته میزان نشست کاهش پیدا می کند. البته به تدریج با افزایش مدول الاستیسیته از شدت تاثیر آن بر روی نشست های سطحی کاسته شده و شیب نمودار به تدریج کاهش می یابد.

بر اساس مطالب ذکر شده در بالا، می توان این چنین بیان نمود که از پارامترهای مورد بررسی بیشترین تاثیر مربوط به مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی می باشد. لذا در این مقاله با تغییر این پارامترها مقادیر نشست های به دست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر نشست های ثبت شده در ابزارهای نصب شده تدقیق گردید.



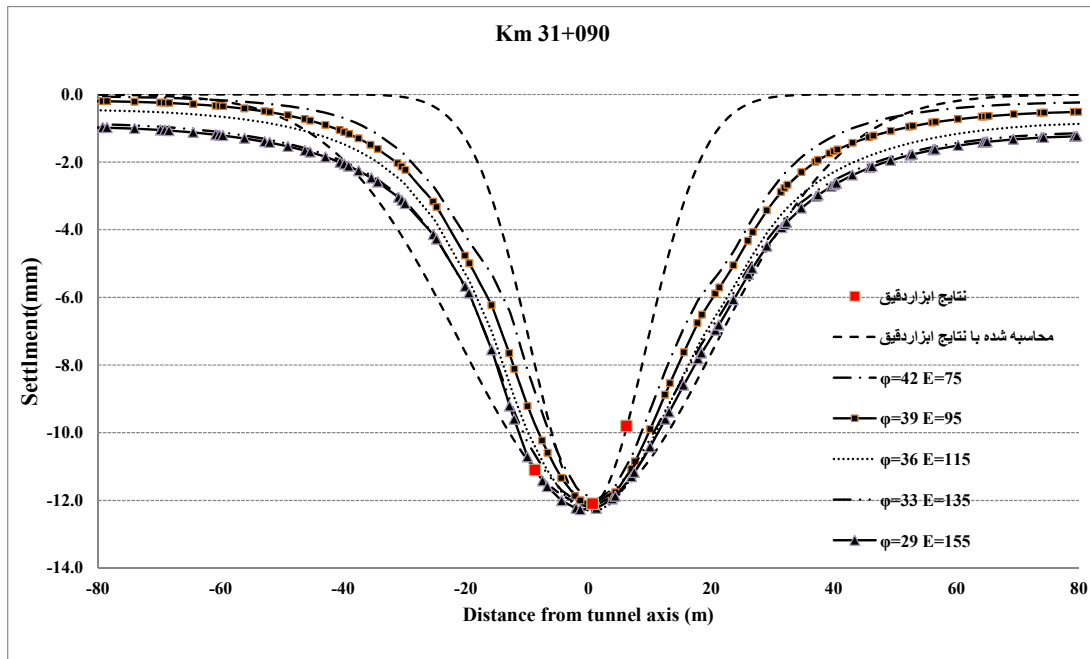
شکل ۷. هندسه مدل



شکل ۸. میزان نشست در سطح زمین

الاستیسیته بین ۷۵ تا ۱۵۵ مگا پاسکال با تغییر زاویه اصطکاک داخلی، مقادیر نشست ابزار دقیق و مدلسازی عددی تدقیق شده است. همچنین در جدول ۵ پارامترهای ژئوتکنیکی اولیه ارایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر مدول الاستیسیته محاسبه شده بر اساس نشست‌ها ۱ تا ۲ برابر مدول الاستیسیته به دست آمده از مطالعات ژئوتکنیک می‌باشد. در شکل ۱۰ نیز مقادیر جابجایی‌های قائم در آخرین مرحله حفاری نشان داده شده است.

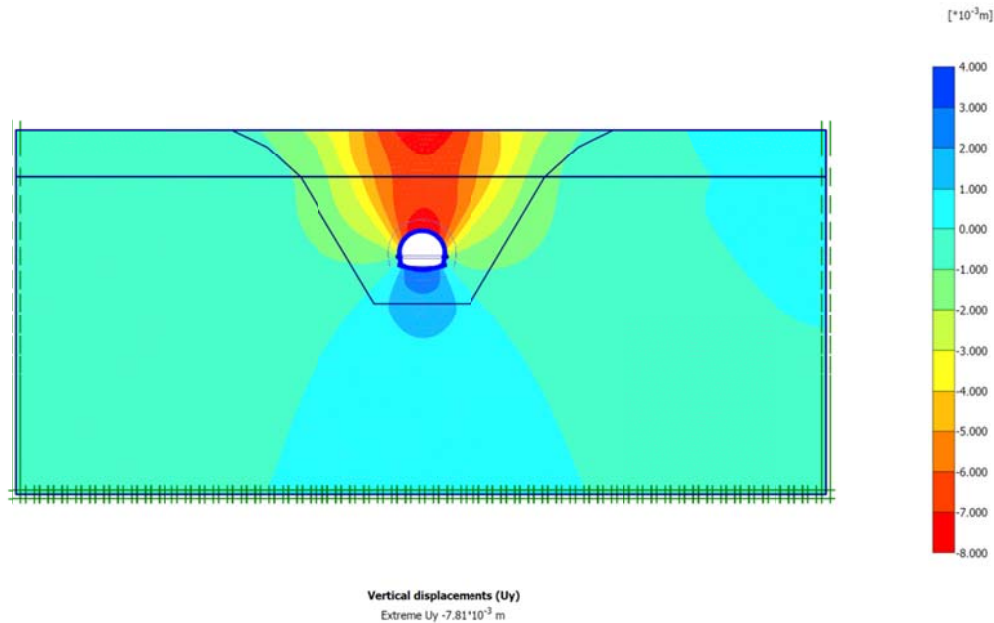
با اصلاح پارامترهای ژئوتکنیکی مقادیر نشست با مقادیر نشست ارائه شده در شکل ۹ منطبق گردید. نکته‌ای که در اینجا باید به آن توجه کرد این است که با توجه به تاثیر زیاد دو پارامتر مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک و تاثیر بسیار محدود چسبندگی خاک، پارامترهای مختلفی برای مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک به دست می‌آید که مقادیر نشست آن با مقادیر نشست ابزار دقیق منطبق می‌شود. در شکل ۹ مقادیر نشست به دست آمده از ابزار دقیق و مدلسازی عددی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود برای مدول



شکل ۹. مقادیر نشست بدست آمده از ابزار دقیق و مدلسازی عددی

جدول ۵. پارامترهای ژئوتکنیکی به دست آمده از مطالعات ژئوتکنیک

Hardening Soil		مینا	
		۰-۱۰	۱۰-۵۰-
$\gamma_{\text{unsat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	۱۹/۹	۱۹/۹
E	[kN/m <sup>2</sup> ]	۳۰۰۰۰	۷۵۰۰۰
$c_{\text{ref}}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	۸	۱۰
$\phi$	[°]	۳۳	۳۲



شکل ۱۰- مقادیر جابجایی های قائم در آخرین مرحله حفاری

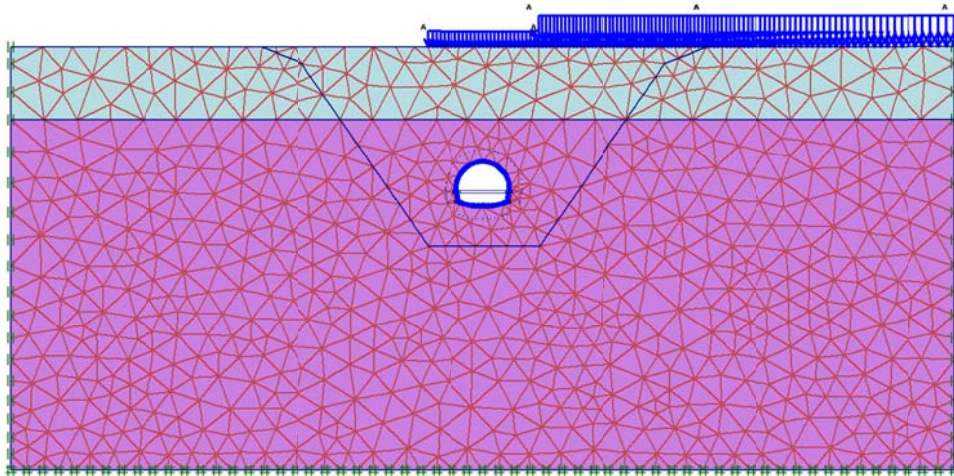
در کیلومتر ۲۸+۲۷۰ در دو طرف این مقطع ساختمان ۴ طبقه قرار گرفته است. ارتفاع روباره در این مقطع برابر ۱۶/۰۰ متر می باشد (شکل ۱۱-ب). بر اساس مدل ساخته شده با استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی مقدار نشست در سطح زمین برابر ۱۹/۸۳ میلیمتر به دست می آید (شکل ۱۲-ب).

در کیلومتر ۲۳+۵۳۸ موقعیت قرارگیری دو ساختمان ۴ طبقه و ۶ طبقه و خیابان در شکل ۱۱-ج نشان داده شده است. ارتفاع روباره در این مقطع برابر ۱۴/۵ متر می باشد. بر اساس مدل ساخته شده با استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی مقدار نشست در سطح زمین در این مقطع برابر ۲۸/۷۵ میلیمتر به دست می آید (شکل ۱۲-ج).

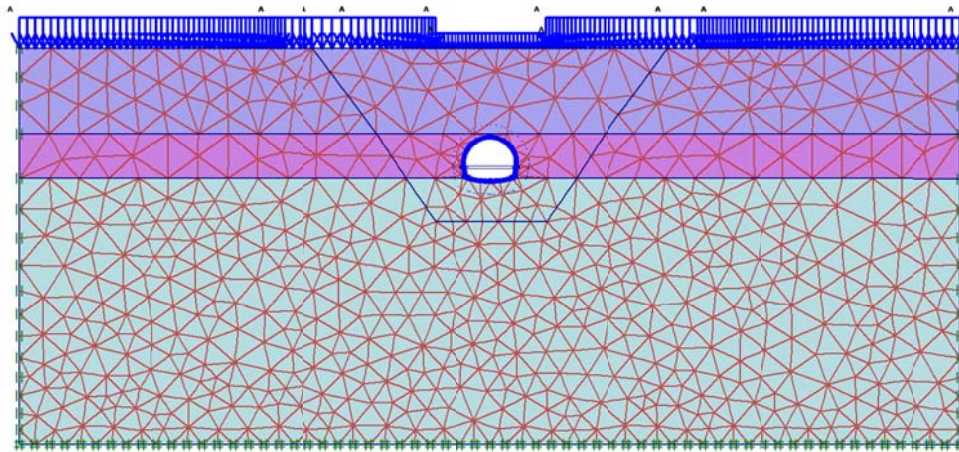
۳-۶- مقادیر نشست در کیلومتر ۳۰+۲۳۰، ۲۸+۲۷۰، ۲۳+۵۳۸

همانطور که در بخش قبلی توضیح داده شد، در اینجا نیز نتایج مدل سازی برای کیلومترهای ۳۰+۲۳۰، ۲۸+۲۷۰، ۲۳+۵۳۸ ارائه شده است.

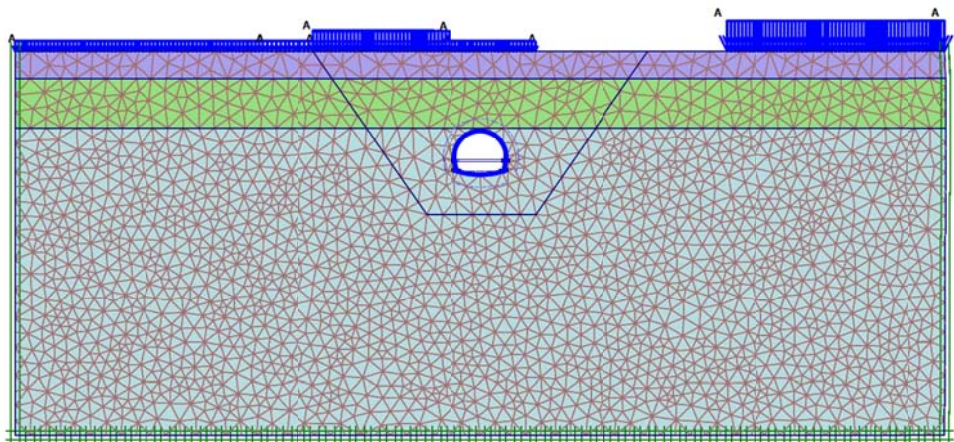
در کیلومتر ۳۰+۲۳۰ در یک سمت مقطع ساختمانی ۴ طبقه قرار گرفته است. ارتفاع روباره در این مقطع برابر ۲۰/۵ متر می باشد (شکل ۱۱-الف). بر اساس مدل ساخته شده با استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی مقدار نشست در سطح زمین برابر ۲۴/۴۵ میلیمتر به دست می آید (شکل ۱۲-الف).



الف) كيلومتر از ۲۳۰+۳۰

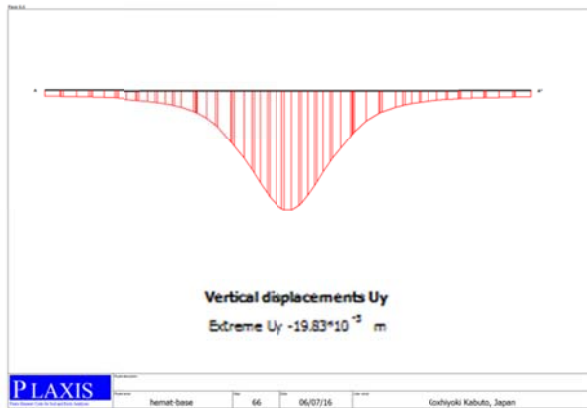


ب) كيلومتر از ۲۷۰+۲۸

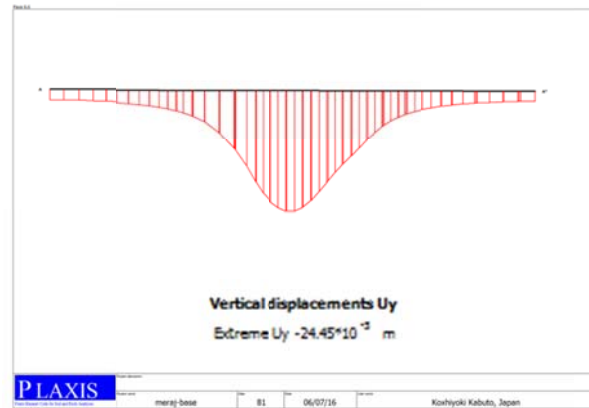


ج) كيلومتر از ۵۳۸+۲۳

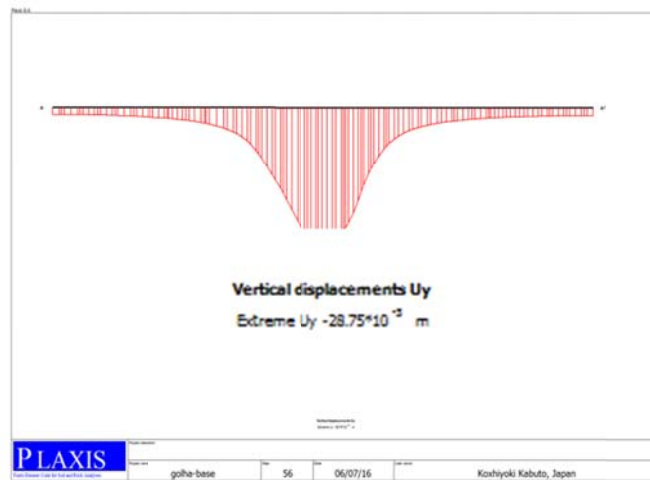
شکل ۱۱. هئدسه مدل



ب) کیلومتر ۲۸+۲۷۰



الف) کیلومتر ۳۰+۲۳۰



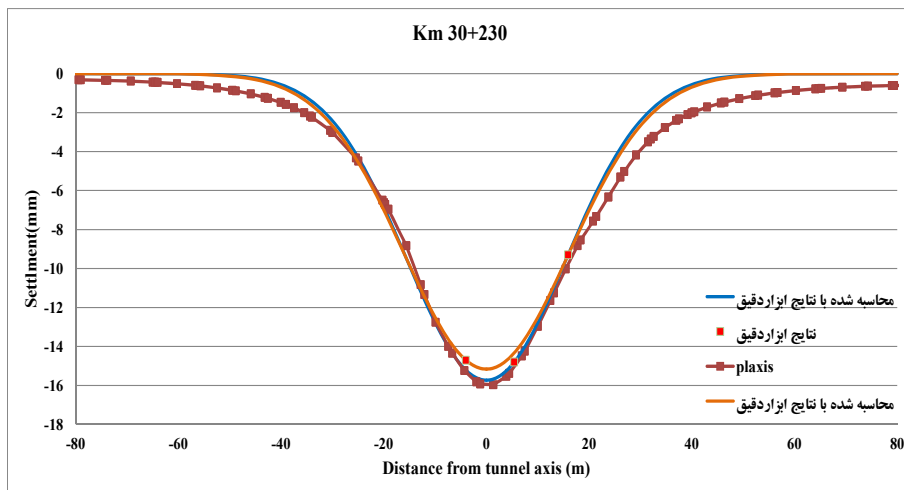
ج) کیلومتر ۲۳+۵۳۸

شکل ۱۲. میزان نشست در سطح زمین بر اساس پارامترهای ژئوتکنیکی

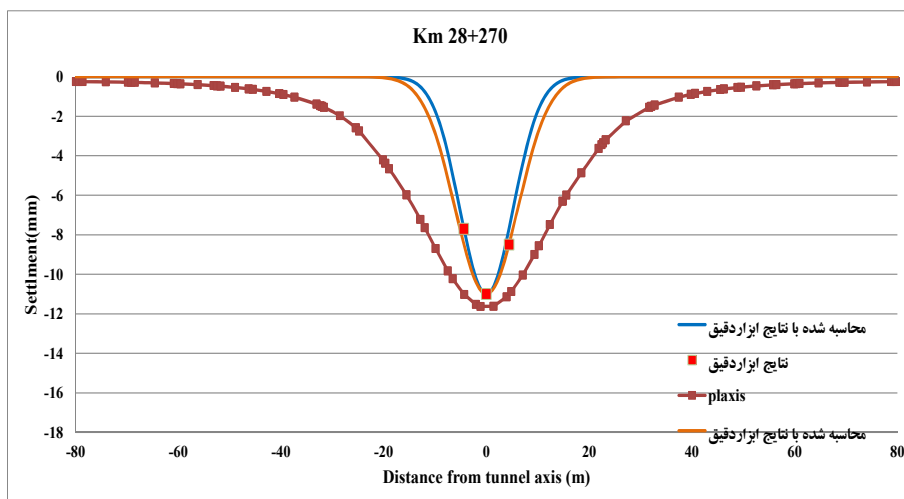
در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مقادیر نشست به دست آمده از ابزار دقیق و مدلسازی عددی در کیلومترهای مختلف نشان داده شده است. همچنین در جدول ۶ پارامترهای ژئوتکنیکی اولیه و اصلاح شده ارائه شده است. در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نیز مقادیر جابجایی‌های قائم در آخرین مرحله حفاری نشان داده شده است.

با اصلاح پارامترهای ژئوتکنیکی که بیشترین تاثیر را مقدار مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک خاک بر روی نشست‌های سطحی داشت، مقادیر نشست با مقادیر نشست ارائه شده در شکل ۲ منطبق شد.

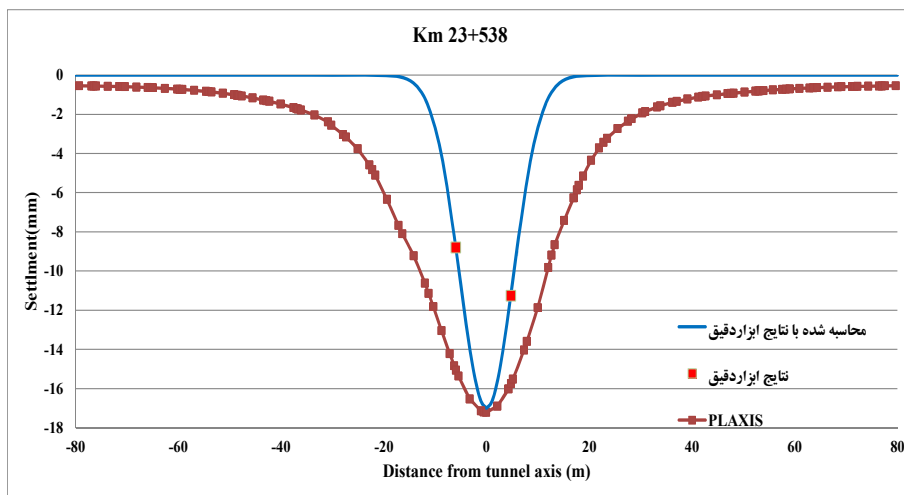




شکل ۱۳. مقادیر نشست بدست آمده از ابزار دقیق و مدلسازی عددی در کیلومتر ۳۰+۲۳۰



شکل ۱۴. مقادیر نشست بدست آمده از ابزار دقیق و مدلسازی عددی در کیلومتر ۲۸+۲۷۰



شکل ۱۵. مقادیر نشست بدست آمده از ابزار دقیق و مدلسازی عددی در کیلومتر ۲۳+۵۳۸

جدول ۶. پارمترهای ژئوتکنیکی مورد استفاده در مدل

الف) کیلومتر از ۲۳۰+۳۰

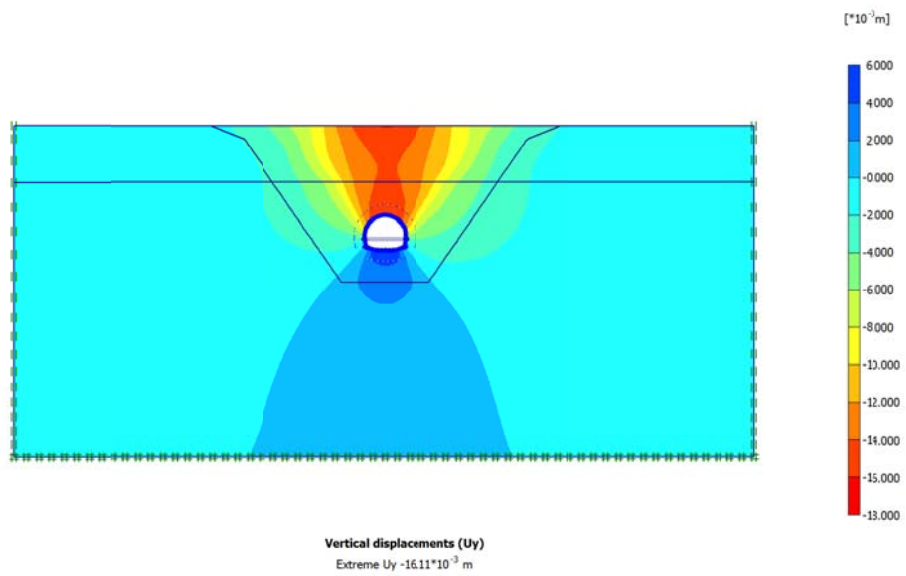
Hardening Soil		مبنا		اصلاح شده	
		۰-۱۳	۱۳-۵۰-	۰-۱۳	۱۳-۵۰-
$\gamma_{unsat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	۲۰/۱	۱۹/۹	۲۰/۱	۱۹/۹
E	[kN/m <sup>2</sup> ]	۳۵۰۰۰	۷۰۰۰۰	۳۵۰۰۰	۷۵۰۰۰
$c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	۸/۰۰	۱۰/۰۰	۸/۰۰	۱۰/۰۰
$\phi$	[°]	۳۴/۰۰	۳۲/۰۰	۳۷/۰۰	۳۸/۰۰

ب) کیلومتر از ۲۷۰+۲۸

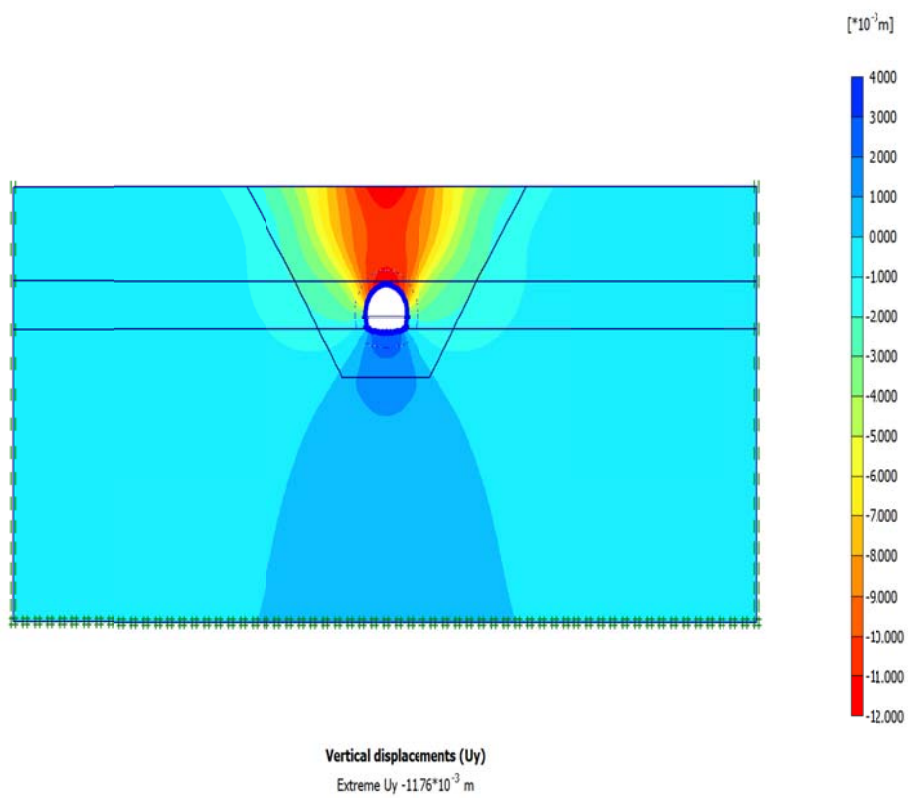
Hardening Soil		مبنا			اصلاح شده		
		۰-۱۶	۱۶-۲۴	۲۴-۵۰-	۰-۱۶	۱۶-۲۴	۲۴-۵۰-
$\gamma_{unsat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	۱۹/۸۰	۲۰/۲۰	۲۰/۴۰	۱۹/۸۰	۲۰/۲۰	۲۰/۴۰
E	[kN/m <sup>2</sup> ]	۴۰۰۰۰	۷۵۰۰۰	۹۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۳۵۰۰۰
$c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	۱۰/۰۰	۱۲/۰۰	۸/۰۰	۱۰/۰۰	۱۲/۰۰	۸/۰۰
$\phi$	[°]	۳۳/۵۰	۳۲/۰۰	۳۴/۰۰	۳۷/۰۰	۳۷/۰۰	۳۹/۰۰

ج) کیلومتر از ۵۳۸+۲۳

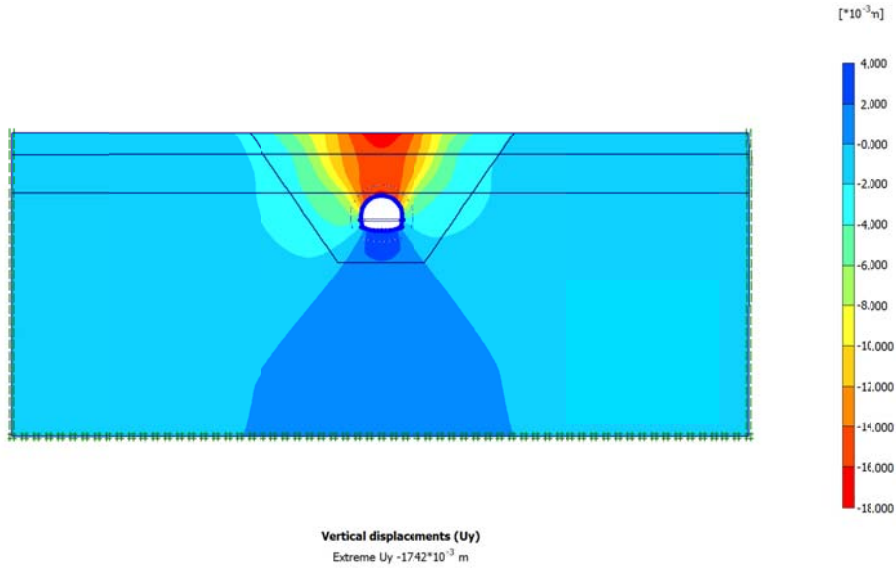
Hardening Soil		مبنا			اصلاح شده		
		۰-۵	۵-۱۴	۱۴-۵۰-	۰-۵	۵-۱۴	۱۴-۵۰-
$\gamma_{unsat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	۱۹/۸۰	۲۰/۵۰	۱۹/۵۰	۱۹/۸۰	۲۰/۵۰	۱۹/۵۰
E	[kN/m <sup>2</sup> ]	۱۹۰۰۰	۳۴۰۰۰	۷۲۰۰۰	۳۰۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۰۵۰۰۰
$c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	۲/۰۰	۸/۰۰	۶/۰۰	۲/۰۰	۸/۰۰	۶/۰۰
$\phi$	[°]	۳۷/۰۰	۳۴/۰۰	۳۵/۰۰	۳۷/۰۰	۳۸/۰۰	۳۸/۰۰



شکل ۱۶. مقادیر جابجایی‌های قائم در آخرین مرحله حفاری در کیلومتر ۲۳۰+۳۰



شکل ۱۷. مقادیر جابجایی‌های قائم در آخرین مرحله حفاری در کیلومتر ۲۷۰+۲۸



شکل ۱۸. مقادیر جابجایی‌های قائم در آخرین مرحله حفاری در کیلومتر ۲۳+۵۳۸

جدول ۷. مقادیر مدول الاستیسیته بر اساس مطالعات ژئوتکنیک و تحلیل برگشتی

نسبت ژئوتکنیک / E تحلیل			E تحلیل برگشتی (کیلو نیوتن بر مترمربع)			E مطالعات ژئوتکنیک (کیلو نیوتن بر مترمربع)			کیلومتر	ردیف
لایه ۳	لایه ۲	لایه ۱	لایه ۳	لایه ۲	لایه ۱	لایه ۳	لایه ۲	لایه ۱		
	۱/۸۰	۲/۳۳		۱۳۵۰۰۰	۷۰۰۰۰		۷۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۱+۰۹۰	۱
	۱/۲۵	۱/۴۱		۱۰۰۰۰۰	۴۵۰۰۰		۸۰۰۰۰	۳۲۰۰۰	۳۰+۵۱۰	۲
	۱/۰۷	۱/۰۰		۷۵۰۰۰	۳۵۰۰۰		۷۰۰۰۰	۳۵۰۰۰	۳۰+۲۳۰	۳
۱/۵۳	۱/۵۰	۱/۷۵	۱۳۰۰۰۰	۴۵۰۰۰	۳۵۰۰۰	۸۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۹+۵۸۵	۴
	۱/۰۰	۱/۱۸		۱۰۰۰۰۰	۶۵۰۰۰		۱۰۰۰۰۰	۵۵۰۰۰	۲۸+۷۶۰	۵
۱/۴۲	۱/۴۷	۱/۶۳	۱۳۵۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۶۵۰۰۰	۹۵۰۰۰	۷۵۰۰۰	۴۰۰۰۰	۲۸+۲۷۰	۶
	۱/۳۳	۱/۶۳		۱۲۰۰۰۰	۶۵۰۰۰		۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۲۶+۶۵۵	۷
۱/۵۳	۱/۵۹	۱/۴۲	۱۱۰۰۰۰	۵۴۰۰۰	۲۷۰۰۰	۷۲۰۰۰	۳۴۰۰۰	۱۹۰۰۰	۲۴+۳۷۵	۸
۱/۴۶	۱/۶۲	۱/۵۸	۱۰۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۷۲۰۰۰	۳۴۰۰۰	۱۹۰۰۰	۲۳+۵۳۸	۹

جدول ۸. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی بر اساس مطالعات ژئوتکنیک و تحلیل برگشتی

ردیف	کیلومتر	$\phi$ مطالعات ژئوتکنیک (درجه)			$\phi$ تحلیل برگشتی (درجه)			نسبت: $\phi$ ژئوتکنیک / $\phi$ تحلیل		
		لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳
۱	۳۱+۰۹۰	۳۳	۳۲		۴۰	۴۰		۱/۲۱	۱/۲۵	
۲	۳۰+۵۱۰	۳۲	۳۳		۳۷	۳۷		۱/۱۶	۱/۱۲	
۳	۳۰+۲۳۰	۳۴	۳۲		۳۷	۳۸		۱/۰۹	۱/۱۹	
۴	۲۹+۵۸۵	۳۴	۳۳	۳۰	۳۷	۳۸	۳۷	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۲۳
۵	۲۸+۷۶۰	۳۴	۳۲/۵		۳۷	۳۶		۱/۰۹	۱/۱۱	
۶	۲۸+۲۷۰	۳۳/۵	۳۲	۳۴	۳۷	۳۷	۳۹	۱/۱۰	۱/۱۶	۱/۱۵
۷	۲۶+۶۵۵	۳۴	۳۲		۳۸	۳۸		۱/۱۲	۱/۱۹	
۸	۲۴+۳۷۵	۳۷	۳۴	۳۵	۳۷	۳۸	۳۹	۱/۰۰	۱/۱۲	۱/۱۱
۹	۲۳+۵۳۸	۳۷	۳۴	۳۵	۳۷	۳۸	۳۸	۱/۰۰	۱/۱۲	۱/۰۹

#### ۶-۴- نتایج تحلیل برگشتی

همانطور که در بخش‌های قبلی بیان شد تحلیل برگشتی در ۹ مقطع مختلف در مسیر تونل انجام شد. لذا، با تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی که بر اساس آنالیز حساسیت انجام شده بیشترین تأثیر را زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته بر روی نشست‌های سطحی داشت، مقادیر نشست‌های به دست آمده از مدلسازی عددی با نتایج نشست‌های ثبت شده توسط ابزار دقیق تددیق شد.

در جدول ۷ مقادیر مدول الاستیسیته و در جدول ۸ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در این ۹ مقطع بر اساس مطالعات ژئوتکنیک و آنالیز برگشتی نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود مقدار مدول الاستیسیته در تحلیل برگشتی با ضریب ۱ الی ۲ افزایش یافته است. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی نیز عمدتاً در محدوده ۳۷ تا ۴۰ درجه متغیر می باشد.

#### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل برگشتی در بخش شمالی خط ۶ متری تهران بر اساس نتایج ابزار دقیق انجام شد. به منظور انجام تحلیل برگشتی، تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل چسبندگی، زاویه اصطکاک، میزان آزاد سازی تنش قبل از نصب سیستم نگهداری و مدول الاستیسیته خاک مورد بررسی قرار گرفت. میزان آزادسازی تنش‌ها بر اساس روابط ارائه شده در مقاله و مقادیر پیشروی انجام شده در هر مقطع محاسبه و در مدلسازی اعمال گردید. بر اساس مدلسازی‌های انجام یافته مشاهده شد که بیشترین تأثیر بر روی نشست‌های سطحی مربوط به مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد. لذا با تغییر مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک خاک، کالیبراسیون بین مدل‌های عددی و نتایج ابزار دقیق انجام یافت. بر اساس آنالیزهای انجام یافته مشاهده شد که مدول الاستیسیته خاک با ضریبی بین ۱ تا ۲ افزایش یافته و مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز در محدوده بین ۳۷ تا ۴۰ متغیر می‌باشد.

Analysis of Monitoring Data in a Urban Tunneling Project”, 5th Tunnel Confrence.

-Geoida, G. (1985), “Some remarks on back analysis and characterization problems in geomechanics”, In Proc. 5th Int. Conf. Nume. Methods in Geomech. Nagoya (Edited by T.Kawamoto), PP. 47-61.

-ITA working Group on General Approaches to the design of tunnels (1998), “Guideline for the design of Tunnels”, Tunneling and Underground space technology, Vol. 3. PP. 149-237.

-Janin, J.P., Dias, D., Emeriault, F., Kastner, R., Le Bissonnais, H., Guilloux, A. (2015), “Numerical back-analysis of the southern Toulon tunnel measurements: A comparison of 3D and 2D approaches”, Engineering Geology, Volume 195, 10 September, pp. 42-52.

-Miranda, T., Dias, D., Eclaircy-Caudron, S., Gomes Correia, A., Costa, L. (2011), “Back analysis of geomechanical parameters by optimisation of a 3D model of an underground structure”, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 26, Issue 6, November 2011, pp. 659-673.

-Miro, S., König, M., Hartmann, D., Schanz, T. (2015), “A probabilistic analysis of subsoil parameters uncertainty impacts on tunnel-induced ground movements with a back-analysisstudy”, Computers and Geotechnics, Volume 68, July, pp. 38-53.

-Moreira, N., Miranda, T., Pinheiro, M., Fernandes, P., Dias, D., Costa, L., Sena-Cruz, J. (2013), “Back analysis of geomechanical parameters in underground

1. Back analysis
2. Hardening soil model
3. Unified Soil Classification System
4. Volume Loss

#### ۹- مراجع

-Aghamalian, M. (2006), “Inverse Analysis of Monitoring Data during Multi-Stage Construction of Resalat Twin Tunnels in Tehran”, M.S.Thesis, School of Civil Engineering-University of Tehran.

-Asadollahpour, E., Rahmannedjad, R., Asghari, A., Abdollahipour, A. (2014), “Back analysis of closure parameters of Panet equation and Burger’s model of Babolak water tunnel conveyance”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 68, June 2014, pp. 159-166.

-Bassiri Tehrani, A. A. (2001), “Inverse Analysis of Tunnel Lining with Minimum of Sum of square Value Method with one Urban Tunnel Case Study”, M.S. Thesis, School of Civil Engineering of University of Tehran.

-Chenyang Zhao, Arash Alimardani Lavasan, Thomas Barciaga, Veselin Zarev, Maria Datcheva, Tom Schanz, (2015), “Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations – The Western Scheldt tunnelcase”, Computers and Geotechnics, Volume 69, September 2015, pp. 601-614.

-Farzaneh, O., Vahdani, S. and Zand, A. G. (2001), “Instrumentation Design and

Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 28, March 2012, pp. 10-17.

-Youssef M.A. Hashash, Séverine Levasseur, Abdolreza Osouli, Richard Finno, Yann Malecot, (2010), “Comparison of two inverse analysis techniques for learning deep excavation response”, Computers and Geotechnics, Volume 37, Issue 3, April, pp. 323–333.

- Zand, A. (1999), “Instrumentation Design and Analysis of Monitoring Data in a Urban Tunneling Project”, M.S. Thesis, School of Civil Engineering -University of Tehran.

works using an Evolution Strategy algorithm”, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 33, January 2013, pp. 143–158.

-Sakurai, S. (1993), “Back Analysis in Rock Engineering Comprehensive Rock Engineering”, Vol. 4, PP. 543- 568.

-Salehi, D. and Fakhimi, A.A. (2002), “Using Inverse Analysis for Estimating Soil Parameters in Resalat Tunnel Project”, 6<sup>th</sup> Tunnel Conference.

-Sharifzadeh, M., Daraei, R., Sharifi Broojerdi, M. (2012), “Design of sequential excavation tunneling in weak rocks through findings obtained from displacements based backanalysis”,