





دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی عددی نشست سازه‌های سطحی تحت تاثیر حفاری تونل‌های دوقلوی خط
۱ متروی تبریز

حامد کریم‌نیا

اساتید راهنما :

دکتر حسین میرزائی نصیرآباد
دکتر شکرا... زارع

اساتید مشاور :

مهندس فریبرز صالحی عالی
مهندس محمد رضا بیطرفان

شهریور ۱۳۹۱



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حامد کریم‌نیا رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان "مدلسازی عددی نشست سازه‌های سطحی تحت تاثیر حفاری تونل‌های دوقلوی خط ۱ متروی تبریز" که در تاریخ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه : امتیاز)	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
			۱- استاد راهنما
			۲- استاد راهنما
			۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
			۴- استاد ممتحن
			۵- استاد ممتحن

تأیید رئیس دانشکده

"تقدیم به پدر و مادر عزیزم"

که از نگاهشان صلابت، از رفتارشان محبت و از صبرشان
ایستادگی را آموختم.

"تقدیم به برادر و خواهر عزیزم"

که وجودشان مایه آرامش من و تکیه‌گاه من در مواجهه با مشکلات
هستند.

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. تحقیق حاضر ثمره مساعدت‌ها و تلاش‌های بسیاری از عزیزانی بوده که همواره مرا مورد لطف و عنایت خود قرار داده و با دلسوزی تمام در کنار من بوده‌اند. شایسته است اکنون که به فضل الهی این تحقیق به پایان رسیده است، از تلاش‌های اساتید راهنمای عزیزم، جناب آقایان دکتر حسین میرزائی و دکتر شکرا... زارع که همواره با صبر و حوصله به راهنمایی‌ام پرداخته‌اند صمیمانه تشکر نمایم.

از مساعدت و همکاری بی‌شائبه جناب آقای مهندس اکبر سالمی که زمینه ساز انجام هر چه بهتر و کامل‌تر این تحقیق بوده‌اند سپاسگزاری می‌گردد.

از جناب آقای مهندس فریبرز صالحی عالی به عنوان مشاور که با راهنمایی خود مرا مورد لطف قرار داده‌اند، آقای مهندس عباس‌نژاد و دکتر برزگری که اطلاعات پر ارزشی در اختیار بنده قرار دادند کمال تشکر را دارم.

با سپاس از دوست عزیزم مهندس وحید نجفی که وقت پر ارزش خویش را در اختیار بنده گذاشتند و مرا در انجام این تحقیق یاری کردند.

تعهد نامه

اینجانب حامد کریم‌نیا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدلسازی عددی نشست سازه‌های سطحی تحت تاثیر حفاری تونل‌های دوقلوی خط ۱ متروی تبریز تحت راهنمایی دکتر حسین میرزائی نصیرآباد و دکتر شکرآ... زارع متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه در شهرهای بزرگ، متروها و تونل‌های شهری به عنوان یکی از کلیدی‌ترین و مهم‌ترین زیرساخت‌های شبکه حمل و نقل شهری به شمار می‌آیند. هر چه محیط شهری شلوغ‌تر و فضای سطحی محدودتر شده، نیاز به ایجاد سازه‌های زیر سطحی مانند تونل‌ها برای تامین این زیرساخت‌ها، بیشتر احساس می‌شود. 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. هدف اصلی این تحقیق مدل‌سازی عددی نشست ساختمان‌های خط یک مترو تبریز در اثر حفاری تمام مقطع به روش EPB می‌باشد. بدین منظور ابتدا نتایج حاصل از رفتارسنجی ساختمان‌های واقع در محدوده ایستگاه ۱۱ تا ۱۲ خط یک مترو تبریز که با استفاده از دوربین نقشه‌برداری انجام گرفته شده بود دسته‌بندی و جابجایی نهایی ساختمان‌ها حاصل گردید. با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری رانکین و نتایج نهایی رفتارنگاری، ساختمان‌های محدوده مورد بررسی طبقه‌بندی شده و مشخص گردید ساختمان‌های شماره ۳، ۴، ۵، ۶، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳ نسبت به سایر ساختمان‌ها در معرض آسیب بیشتری قرار دارند. به همین منظور برای بررسی بیشتر از مدل‌سازی عددی سه بعدی با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D Tunnel برای بررسی مقاطع بحرانی مورد نظر استفاده شده است. برای تعیین دقیق منحنی نشست ساختمان‌ها، تحلیل حساسیت در راستای طولی مدل انجام گرفته شده و با توجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مشخص گردید که در فاصله ۳D از ابتدا و انتهای ساختمان تا مرز مدل نشست‌ها به حالت ایستا می‌رسد. سپس با استفاده از این مدل بهینه، نشست سطح زمین و ساختمان‌ها در ۷ فاز هنگام عبور دستگاه حفاری از زیر یا کنار ساختمان و یک فاز نهایی که آخرین سیستم نگهداری نصب شده به فاصله ۳D از انتهای ساختمان قرار

دارد بررسی شده و در نهایت به مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی و نتایج واقعی پرداخته شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مقادیر بدست آمده از مدل عددی در محدوده نتایج حاصل از رفتارنگاری ساختمان‌ها قرار دارند. همچنین محدوده تاثیر حفاری تونل در تمامی مقاطع در جهت عرضی، تا ۴۰ متری از محور مرکزی تونل بوده و ساختمان‌ها هر چه دورتر از محور مرکزی تونل قرار بگیرند، تاثیرپذیری کمتری از مراحل مختلف تونلسازی دارند.

کلمات کلیدی: خط یک مترو تبریز، EPB، نشست، اندیس آسیب‌پذیری (I_v)، تحلیل حساسیت،

مدلسازی عددی

مقاله مستخرج از پایان نامه

۱- "بررسی تحلیلی نشست سازه‌های سطحی تحت تأثیر حفاری تونل‌های دوقلوی

شهری - مطالعه موردی: تونل‌های دوقلوی خط یک متروی تبریز". چهارمین کنفرانس

مهندسی معدن. مهر ماه ۱۳۹۱، تهران- ایران

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه..... ۱

۱-۱ کلیات..... ۲

۲-۱ اهداف و ضرورت انجام پایان نامه ۳

۳-۱ روش انجام تحقیق..... ۴

۴-۱ ساختار پایان نامه..... ۵

فصل دوم: مروری بر مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در زمینه نشست ناشی از تونلسازی..... ۶

۱-۲ پدیده نشست..... ۷

۱-۱-۲ فاکتورهای موثر در بروز پدیده نشست در اثر حفر تونل..... ۸

۱-۱-۲-۱ شرایط زمین شناسی..... ۸

۱-۱-۲-۲ روش حفاری..... ۹

۱-۱-۲-۳ عمق تونل..... ۹

۱-۱-۲-۴ ابعاد فضای حفاری..... ۱۰

۱-۱-۲-۵ میدان تنش..... ۱۱

۱-۲-۲ دلایل نشست زمین در اثر حفر تونل..... ۱۱

۲-۲ نشست ناشی از حفاری مکانیزه..... ۱۱

۱-۲-۲ سپرهای متعادل کننده فشار زمین (EPB)..... ۱۲

۱-۱-۲-۲ عوامل موثر بر نشست در تونلسازی مکانیزه..... ۱۴

۲-۱-۲-۲ نشست های ایجاد شده در اثر تونلسازی مکانیزه با سپر..... ۱۶

۳-۲ روش های پیش بینی نشست..... ۱۹

۱-۳-۲ روش های تجربی..... ۱۹

۱-۱-۳-۲ روش لیتونیسیم (۱۹۵۶)..... ۱۹

۲-۱-۳-۲ روش پک (۱۹۶۹)..... ۲۰

۲۲	۲-۳-۱-۳ روش اوتتو (۱۹۷۹).....
۲۳	۲-۳-۱-۴ روش میر و تیلور (۱۹۸۲).....
۲۴	۲-۳-۱-۵ روش هرزوغ (۱۹۸۵).....
۲۴	۲-۳-۲ روش‌های تحلیلی.....
۲۴	۲-۳-۱-۲ روش ساگاستا و گونزالس.....
۲۴	۲-۳-۲-۲ روش ورویوجیت و بوکر (۱۹۹۶).....
۲۵	۲-۳-۳-۲ روش لاگاناتان و پولوس (۱۹۹۸).....
۲۶	۲-۳-۳ مدلسازی فیزیکی.....
۲۷	۲-۳-۴ روش‌های عددی.....
۲۷	۲-۳-۱-۴ تحلیل‌های دو بعدی.....
۳۰	۲-۳-۴-۲ تحلیل‌های سه بعدی.....
۳۲	۲-۳-۵ تحلیل شبکه عصبی.....
۳۴	۲-۴ نتیجه‌گیری.....
۳۷	فصل سوم: ارزیابی آسیب وارد بر سازه‌ها در اثر نشست سطح زمین.....
۳۸	۳-۱ مقدمه.....
۳۸	۳-۲ پیش‌بینی آسیب وارد بر سازه‌ها.....
۳۹	۳-۳ بررسی آسیب وارد بر سازه‌ها.....
۳۹	۳-۳-۱ فرایند ارزیابی ریسک آسیب برای ساختمان‌ها.....
۴۳	۳-۳-۲ طبقه‌بندی ساختمان‌ها.....
۴۳	۳-۳-۱-۲ روش اندیس آسیب‌پذیری.....
۴۷	۳-۳-۳ حداکثر نشست مجاز سازه‌ها.....
۴۹	۳-۳-۴ روش‌های کاهش نشست ساختمان‌ها.....
۵۲	۳-۴ نتیجه‌گیری.....
۵۴	فصل چهارم: معرفی پروژه خط یک مترو تبریز.....

۵۵.....	۱-۴ معرفی طرح قطار شهری تبریز
۵۶.....	۱-۱-۴ موقعیت و محل پروژه قطار شهری تبریز
۵۷.....	۲-۱-۴ زمین شناسی عمومی منطقه
۵۸.....	۳-۱-۴ بررسی ساختاری مسیر
۶۰.....	۲-۴ مطالعات ژئوتکنیک.....
۶۱.....	۱-۲-۴ عملیات گمانه‌زنی.....
۶۱.....	۲-۲-۴ آزمایش‌های صحرایی
۶۲.....	۳-۲-۴ آزمایش‌های آزمایشگاهی
۶۲.....	۳-۴ روش حفاری.....
۶۳.....	۴-۴ نتیجه‌گیری.....
۶۴.....	فصل پنجم: تعیین کلاس ریسک آسیب‌پذیری ساختمان‌های خط یک متروی تبریز.....
۶۵.....	۱-۵ مشخصات ساختمان‌های محدوده مورد مطالعه.....
۶۶.....	۲-۵ طبقه‌بندی ساختمان‌های محدوده مورد مطالعه.....
۷۳.....	۳-۵ نتیجه‌گیری.....
۷۴.....	فصل ششم: تخمین نشست سطح زمین با روش‌های تحلیلی و تجربی.....
۷۵.....	۱-۶ مقدمه.....
۷۵.....	۲-۶ روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس.....
۸۲.....	۳-۶ روش تجربی پک.....
۸۸.....	۴-۶ نتیجه‌گیری.....
۸۹.....	فصل هفتم: مدلسازی عددی و تحلیل مسائل مربوط به نشست ناشی از تونلسازی.....
۹۰.....	۱-۷ مدلسازی عددی.....
۹۰.....	۱-۱-۷ مقدمه
۹۰.....	۲-۱-۷ روش FEM.....
۹۱.....	۳-۱-۷ معرفی نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL

۹۲.....	۲-۷ مدل‌سازی عددی مقاطع مورد مطالعه خط یک مترو تبریز.....
۹۲.....	۱-۲-۷ روند مدل‌سازی مسئله مورد نظر.....
۹۲.....	۱-۱-۲-۷ کالیبراسیون مدل.....
۹۴.....	۲-۱-۲-۷ انتخاب مدل رفتاری.....
۹۵.....	۳-۱-۲-۷ سختی اندرکنش (R_{inter}).....
۹۶.....	۴-۱-۲-۷ سیستم نگهداری.....
۹۸.....	۵-۱-۲-۷ همگرایی تونل.....
۹۹.....	۲-۲-۷ تعیین هندسه مدل اجزاء محدود تونل‌های خط یک مترو تبریز در مقاطع مورد مطالعه.....
۱۰۱.....	۳-۲-۷ ارزیابی تاثیر مراحل مختلف حفاری بر نشست سطح زمین و پی سازه‌ها در مقاطع مورد بررسی.....
۱۰۳.....	۱-۳-۲-۷ شبیه‌سازی مراحل حفاری.....
۱۰۵.....	۲-۳-۲-۷ تحلیل نشست ساختمان‌های مقطع ۱.....
۱۲۲.....	۳-۳-۲-۷ تحلیل نشست ساختمان‌های مقطع ۲.....
۱۳۷.....	۴-۳-۲-۷ تحلیل نشست ساختمان‌های مقطع ۳.....
۱۵۲.....	۵-۳-۲-۷ تحلیل نشست ساختمان‌های مقطع ۴.....
۱۶۷.....	۴-۲-۷ تاثیر وزن ساختمان.....
۱۷۲.....	۳-۷ جمع‌بندی نتایج حاصل از تحلیل عددی مقاطع مورد بررسی.....
۱۷۴.....	فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....
۱۷۵.....	۱-۸ مقدمه.....
۱۷۵.....	۲-۸ نتیجه‌گیری.....
۱۷۹.....	۳-۸ پیشنهادات.....
۱۸۱.....	منابع.....
۱۸۳.....	پیوست.....

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): نشست منتقل شده به سطح زمین در شرایط الف) همگن ب) ناهمگن..... ۸
- شکل (۲-۲): حالت‌های انتقال نشست به سطح زمین الف) حالت اول ب) حالت دوم..... ۱۰
- شکل (۳-۲): دستگاه متعادل کننده فشار زمین..... ۱۳
- شکل (۴-۲): الف) افت سینه کار، ب) افت شعاعی بخشی سپر، ج) افت شعاعی کلی روی سپر، د) افت شعاعی..... ۱۵
- شکل (۵-۲): نشست‌های ناشی از دستگاه EPB..... ۱۸
- شکل (۶-۲): پروسه نشست تصادفی..... ۱۹
- شکل (۷-۲): پیشروی تونل تحت تاثیر تمام مولفه‌های افت زمین شامل بیش حفاری، کجی کله حفار و مهارت اپراتور..... ۲۶
- شکل (۸-۲): روش گپ (۱۹۸۳)..... ۲۸
- شکل (۹-۲): روش کاهش تنش (۱۹۹۷)..... ۲۸
- شکل (۱۰-۲): روش همگرایی..... ۲۹
- شکل (۱۱-۲): هندسه گودی نشست القایی در اثر تونلسازی..... ۳۱
- شکل (۱۲-۲): ساختار شبکه عصبی استفاده شده برای پیش‌بینی حداکثر نشست در تاج تونل..... ۳۴
- شکل (۱-۳): فلوجارت ارزیابی ریسک ساختمان..... ۴۰
- شکل (۲-۳): الف) تزریق مایل برای ایجاد حائل بین ساختمان و تونل ب) اجرا تزریق از طریق چاه دسترسی برای تحکیم خاک پی زیر ساختمان ج) قوس محافظ تزریق شده از سطح زمین برای تحکیم محیط تونل د) قوس محافظ تزریق شده از طریق چاه دسترسی و تونل پایلوت..... ۵۱
- شکل (۱-۴): طرح خطوط مترو تبریز..... ۵۴
- شکل (۲-۴): نقشه موقعیت محل پروژه..... ۵۶
- شکل (۳-۴): وضعیت زمین‌شناسی تبریز و ساختار قطار شهری تبریز..... ۵۸
- شکل (۴-۴): موقعیت گمانه‌ها..... ۶۰
- شکل (۵-۴): مسیر ایستگاه ۱۱-۱۲ خط یک مترو تبریز..... ۶۲
- شکل (۱-۵): اندیس آسیب‌پذیری ساختمان‌های مسیر خط یک متروی تبریز..... ۶۸
- شکل (۲-۵): کلاس ریسک آسیب‌پذیری ساختمان‌های مسیر خط یک متروی تبریز..... ۶۸
- شکل (۳-۵): مراحل مختلف آنالیز ریسک نشست..... ۶۹
- شکل (۴-۵): ساختمان‌ها و مقاطع مورد بررسی..... ۷۰
- شکل (۱-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۱ (با در نظر گرفتن $g=280$)..... ۷۵
- شکل (۲-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۱..... ۷۶
- شکل (۳-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۲ (با در نظر گرفتن $g=280$)..... ۷۶
- شکل (۴-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۲..... ۷۷
- شکل (۵-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۳ (با در نظر گرفتن $g=280$)..... ۷۷
- شکل (۶-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۳..... ۷۸

- شکل (۶-۷): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۴ (با در نظر گرفتن $g=280$)..... ۷۸
- شکل (۶-۸): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۴..... ۷۹
- شکل (۶-۹): ماکزیمم نشست نسبت به فاکتور تصحیح در روش لاگاناتان و پولوس..... ۸۱
- شکل (۶-۱۰): نمودارهای نشست سطح زمین با روش پک برای مقطع ۱..... ۸۲
- شکل (۶-۱۱): نمودارهای نشست سطح زمین با روش پک برای مقطع ۲..... ۸۲
- شکل (۶-۱۲): نمودارهای نشست سطح زمین با روش پک برای مقطع ۳..... ۸۳
- شکل (۶-۱۳): نمودارهای نشست سطح زمین با روش پک برای مقطع ۴..... ۸۳
- شکل (۷-۱): تغییرات نسبت نشست برای فواصل مختلف از مرز مدل..... ۹۴
- شکل (۷-۲): مدلی از یک حلقه پوشش بتنی با قطعات یکسان و منظم..... ۹۶
- شکل (۷-۳): شرایط مرزی اعمال شده به مدل..... ۱۰۰
- شکل (۷-۴): موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در المان‌ها..... ۱۰۰
- شکل (۷-۵): نقاط تعیین شده زیر پی ساختمان به منظور ارزیابی نشست‌ها..... ۱۰۳
- شکل (۷-۶): پلان مراحل مختلف حفاری هنگام عبور از زیر یا کنار ساختمان..... ۱۰۴
- شکل (۷-۷): مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۱..... ۱۰۵
- شکل (۷-۸): منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۱ در مراحل مختلف حفاری..... ۱۰۸
- شکل (۷-۹): کنتور جابجایی قائم مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول..... ۱۰۹
- شکل (۷-۱۰): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول..... ۱۰۹
- شکل (۷-۱۱): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول..... ۱۱۰
- شکل (۷-۱۲): کنتور جابجایی قائم مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۱۰
- شکل (۷-۱۳): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۱۱
- شکل (۷-۱۴): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۱۱
- شکل (۷-۱۵): پی ساختمان و سطح مقاطع مورد بررسی..... ۱۱۲
- شکل (۷-۱۶): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول..... ۱۱۳
- شکل (۷-۱۷): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول..... ۱۱۵
- شکل (۷-۱۸): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۱۷
- شکل (۷-۱۹): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۱۹
- شکل (۷-۲۰): مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۲..... ۱۲۲
- شکل (۷-۲۱): منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۲ در مراحل مختلف حفاری..... ۱۲۵
- شکل (۷-۲۲): کنتور جابجایی قائم مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول..... ۱۲۵
- شکل (۷-۲۳): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول..... ۱۲۶
- شکل (۷-۲۴): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول..... ۱۲۶
- شکل (۷-۲۵): کنتور جابجایی قائم مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۲۷

- شکل (۷-۲۶): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم.....۱۲۷
- شکل (۷-۲۷): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم.....۱۲۷
- شکل (۷-۲۸): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول.....۱۲۹
- شکل (۷-۲۹): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول.....۱۳۱
- شکل (۷-۳۰): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم.....۱۳۳
- شکل (۷-۳۱): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در مقاطع AB و CD مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم.....۱۳۵
- شکل (۷-۳۲): مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۳.....۱۳۷
- شکل (۷-۳۳): منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۳ در مراحل مختلف حفاری.....۱۴۰
- شکل (۷-۳۴): کنتور جابجایی قائم مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول.....۱۴۱
- شکل (۷-۳۵): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول.....۱۴۱
- شکل (۷-۳۶): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول.....۱۴۱
- شکل (۷-۳۷): کنتور جابجایی قائم مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم.....۱۴۲
- شکل (۷-۳۸): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم.....۱۴۲
- شکل (۷-۳۹): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم.....۱۴۳
- شکل (۷-۴۰): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول.....۱۴۴
- شکل (۷-۴۱): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول.....۱۴۶
- شکل (۷-۴۲): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم.....۱۴۸
- شکل (۷-۴۳): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در مقاطع AB و CD مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم.....۱۵۰
- شکل (۷-۴۴): مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۴.....۱۵۲
- شکل (۷-۴۵): منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۴ در مراحل مختلف حفاری.....۱۵۵
- شکل (۷-۴۶): کنتور جابجایی قائم پس از حفاری تونل اول.....۱۵۶
- شکل (۷-۴۷): پروفیل نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول.....۱۵۶
- شکل (۷-۴۸): کنتور جابجایی افقی سطح زمین پس از حفاری تونل اول.....۱۵۷
- شکل (۷-۴۹): کنتور جابجایی قائم پس از حفاری تونل دوم.....۱۵۷
- شکل (۷-۵۰): پروفیل نشست سطح زمین پس از حفاری تونل دوم.....۱۵۸
- شکل (۷-۵۱): کنتور جابجایی افقی سطح زمین پس از حفاری تونل دوم.....۱۵۸
- شکل (۷-۵۲): منحنی‌های نشست سطح زمین در مقاطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول.....۱۶۰
- شکل (۷-۵۳): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در مقاطع AB و CD مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول.....۱۶۲

شکل (۷-۵۴) : منحنی‌های نشست سطح زمین در مقاطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۶۴

شکل (۷-۵۵) : کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در مقاطع AB و CD مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۶۶

شکل (۷-۵۶) : منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین به ازای ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه..... ۱۶۸

شکل (۷-۵۷) : منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با طبقات مختلف در محور مرکزی تونل..... ۱۶۹

شکل (۷-۵۸) : منحنی نشست سطح زمین نسبت به عمق در مقاطع مورد بررسی..... ۱۷۰

شکل (۷-۵۹) : منحنی نشست طولی در مقاطع مورد بررسی..... ۱۷۱

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲): مقادیر V_L و k بر اساس شرایط سینه کار و روباره..... ۱۶

جدول (۲-۲): احتمال انتقال نشست به سطح زمین بر اساس شرایط سینه کار و روباره..... ۱۶

جدول (۳-۲): دلایل و مکانیزم نشست‌ها..... ۱۸

جدول (۴-۲): مقادیر V_L بر اساس روش‌های مختلف اجرا..... ۲۲

جدول (۵-۲): روابط تجربی برای تخمین مقدار پارامتر گودی نشست..... ۲۲

جدول (۶-۲): خلاصه‌ای از جزئیات تحلیل‌های اجزاء محدود سه بعدی ۳۱

جدول (۱-۳): نحوه محاسبه اندیس آسیب‌پذیری (I_v) ۴۳

جدول (۲-۳): طبقه‌بندی آسیب رانکین برای مترو پورتو با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری..... ۴۶

جدول (۳-۳): طبقه‌بندی آسیب بولند برای مترو پورتو با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری..... ۴۷

جدول (۴-۳): ماکزیمم نشست مجاز برای برخی سازه‌ها..... ۴۷

جدول (۵-۳): حداکثر نشست نسبی برای انواع ساختمان‌ها بر اساس آئین نامه (USSR) ۴۹

جدول (۱-۴): سازندهای تشکیل دهنده محدوده شهر تبریز..... ۵۸

جدول (۱-۵): مشخصات ساختمان‌های واقع در محدوده مورد بررسی..... ۶۵

جدول (۲-۵): طبقه‌بندی ساختمان‌ها با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری رانکین..... ۶۷

جدول (۳-۵): ساختمان‌های مورد بررسی..... ۷۰

جدول (۴-۵): موقعیت ساختمان‌ها نسبت به گمانه‌های حفاری شده..... ۷۱

جدول (۵-۵): خصوصیات ژئومکانیکی گمانه MBH9..... ۷۲

جدول (۶-۵): خصوصیات ژئومکانیکی گمانه MBH10..... ۷۲

جدول (۷-۵): خصوصیات ژئومکانیکی گمانه FBH15..... ۷۲

جدول (۸-۵): موقعیت گمانه‌ها نسبت به مقاطع و سطح آب زیرزمینی در گمانه‌ها..... ۷۳

جدول (۱-۶): نتایج نشست با روش لاگاناتان و پولوس برای مقطع ۱..... ۸۰

جدول (۲-۶): نتایج نشست با روش لاگاناتان و پولوس برای مقطع ۲..... ۸۱

جدول (۳-۶): نتایج نشست با روش لاگاناتان و پولوس برای مقطع ۳..... ۸۱

جدول (۴-۶): نتایج نشست با روش لاگاناتان و پولوس برای مقطع ۴..... ۸۱

جدول (۵-۶): نتایج نشست با روش پک برای مقطع ۱..... ۸۵

جدول (۶-۶): نتایج نشست با روش پک برای مقطع ۲..... ۸۵

جدول (۷-۶): نتایج نشست با روش پک برای مقطع ۳..... ۸۶

جدول (۸-۶): نتایج نشست با روش پک برای مقطع ۴..... ۸۷

جدول (۱-۷): تحلیل حساسیت به منظور بدست آوردن ابعاد مدل بهینه..... ۹۳

جدول (۲-۷): مشخصات ساختمان برای کالیبراسیون ۹۳

جدول (۳-۷): استاندارد بارگذاری (ASHTO, ۲۰۰۲)..... ۹۳

جدول (۴-۷): مقادیر مختلف اندرکنش..... ۹۵

جدول (۷-۵): پارامترهای سیستم نگهداری.....	۹۸
جدول (۷-۶): فاصله سازه‌ها از محور تونل.....	۱۰۰
جدول (۷-۷): مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۱.....	۱۰۵
جدول (۷-۸): مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۱.....	۱۰۶
جدول (۷-۹): مقاطع مورد بررسی.....	۱۰۶
جدول (۷-۱۰): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول.....	۱۱۶
جدول (۷-۱۱): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم.....	۱۲۰
جدول (۷-۱۲): مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۱.....	۱۲۰
جدول (۷-۱۳): مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۲.....	۱۲۳
جدول (۷-۱۴): مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۲.....	۱۲۳
جدول (۷-۱۵): مقاطع مورد بررسی.....	۱۲۳
جدول (۷-۱۶): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول.....	۱۳۱
جدول (۷-۱۷): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم.....	۱۳۶
جدول (۷-۱۸): مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۲.....	۱۳۶
جدول (۷-۱۹): مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۳.....	۱۳۷
جدول (۷-۲۰): مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۳.....	۱۳۸
جدول (۷-۲۱): مقاطع مورد بررسی.....	۱۳۸
جدول (۷-۲۲): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول.....	۱۴۷
جدول (۷-۲۳): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم.....	۱۵۱
جدول (۷-۲۴): مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۳.....	۱۵۱
جدول (۷-۲۵): مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۴.....	۱۵۳
جدول (۷-۲۶): مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۴.....	۱۵۳
جدول (۷-۲۷): مقاطع مورد بررسی.....	۱۵۳
جدول (۷-۲۸): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول.....	۱۶۲
جدول (۷-۲۹): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم.....	۱۶۶
جدول (۷-۳۰): مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۴.....	۱۶۷
جدول (۷-۳۱): نتایج نهایی ماکزیمم نشست ساختمان‌ها.....	۱۷۲
جدول (۸-۱): نتایج نشست نهایی سطح زمین در حالت سطح آزاد و با وجود ساختمان برای مقاطع مورد بررسی.....	۱۷۶
جدول (۸-۲): طبقه‌بندی ساختمان‌ها با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری رانکین و نشست حاصل از تحلیل عددی.....	۱۷۷

فصل اول

مقدمه

۱ فصل اول: مقدمه

۱-۱ کلیات

به دلیل رشد روزافزون جمعیت در مناطق شهری، نیاز به توسعه سیستم‌های خدمات‌رسانی از قبیل حمل و نقل، تاسیسات و ذخیره‌سازی بیشتر احساس می‌شود. در همین راستا حفر تونل‌های کم‌عمق شهری توجه خاصی پیدا کرده است. سازگاری با محیط زیست و محیط شهری، مقاومت زیاد در برابر زلزله، استفاده‌های استراتژیک، سرعت و حجم بالای انتقال مسافر برخی از مزایای قطار شهری می‌باشد که باعث توسعه آن در جوامع امروزی شده است. با توجه به اینکه در محیط‌های شهری توده در برگیرنده سست بوده، اغلب حفاری تونل با ابعاد کوچکتر و زون تاثیر کمتر توصیه می‌گردد. در اکثر موارد مسیر تونل‌ها به ناچار از زیر ساختمان‌های متعددی عبور می‌نماید که در بعضی موارد فاصله بین جداره تونل و پی ساختمان بسیار کم بوده و در اکثر موارد حفاری تونل باعث ایجاد جابجایی‌ها و تغییر شکل‌هایی در سطح زمین و در نتیجه وارد آمدن آسیب به ساختمان‌ها می‌شود. از این رو پیش‌بینی دقیق نشست‌های بوجود آمده ناشی از حفاری تونل‌ها خیلی مهم می‌باشد.

روش‌های تجربی و تحلیلی متعددی به منظور تخمین نشست ناشی از تونلسازی وجود دارد، که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: اولین روش برای پیش‌بینی نشست توسط لیتونیسیزم (۱۹۵۶) ارائه شد. پس از آن می‌توان به روش‌های تجربی پک (۱۹۶۹)، اوتئو (۱۹۷۹)، هرزوغ (۱۹۹۲)، آری‌اغلو (۱۹۹۲)، روش‌های تحلیلی ساگاستا (۱۹۸۷)، وروبیجیت و بوکر (۱۹۹۶)، لاگاناتان و پولوس (۱۹۹۸)، مدلسازی فیزیکی اتکینسون و همکاران (۱۹۷۵)، هادسون و همکاران (۱۹۷۶)، اتکینسون و پوتز (۱۹۷۷)، کیمورا و میر (۱۹۸۱) و نوموتو و همکاران (۱۹۹۹)، آفتس (۲۰۰۱) و وینای (۲۰۰۷) اشاره کرد.

در هیچ یک از روش‌های تجربی و تحلیلی تاثیر پارامترهای اجرایی و سازه‌های اطراف در نظر گرفته نشده است. در مطالعات مختلفی تحلیل‌های عددی دو بعدی و سه بعدی نیز در ارزیابی برهمکنش تونل-سازه مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: گپ (۱۹۸۳)، پانت و جوینوت (۱۹۸۲)، سوبودا (۱۹۷۹)، برینک (۱۹۹۳)، آدنبروک و همکاران (۱۹۹۷)، گرین وود (۲۰۰۳)، توماس کسپر (۲۰۰۵)، لامبروگی (۲۰۱۱). ولی کمتر به صورت کلی به بررسی همزمان تاثیر پارامترهای اجرایی در میزان نشست و همچنین برهمکنش آن‌ها با سازه‌های اطراف پرداخته شده است.

۱-۲ اهداف و ضرورت پایان‌نامه

در راستای کاهش مشکلات ترافیکی شهر تبریز، مطالعات خط یک و دو قطار شهری در سال ۱۳۸۰ آغاز و شبکه قطار شهری تبریز شامل ۴ مسیر جمعا حدود ۶۰ کیلومتر و ۶۰ ایستگاه طراحی گردید. در این تحقیق 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 سنتی بوده و شامل ساختمان‌ها و سازه‌هایی با قدمت زیاد و عدم استحکام کافی می‌باشد مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است. با توجه به اهمیت موضوع، اندازه‌گیری نشست‌ها و تغییر مکان‌های محتمل ساختمان‌ها و سازه‌های موجود در مسیر امری ضروری به نظر می‌رسد. در رابطه با پیش‌بینی نشست‌های ایجاد شده در این محدوده از خط یک قطار شهری تبریز که تونل‌ها به روش تمام مقطع با استفاده از دستگاه تعادل فشار زمین^۱ (EPB) حفاری می‌شوند تاکنون تحقیقاتی صورت نگرفته است.

هدف اصلی از این تحقیق بررسی ساختمان‌ها و سازه‌های مسیر پروژه و شناسایی سازه‌های پر خطر و در نهایت تخمین نشست سطح زمین و ساختمان‌ها و همچنین مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج رفتارسنجی ساختمان‌ها، نتایج تجربی و نتایج تحلیلی می‌باشد. بدین منظور ابتدا رفتارسنجی

^۱ Earth Pressur Balance

ساختمان‌ها با استفاده از دوربین نقشه‌برداری انجام گرفته، سپس نتایج نهایی رفتارسنجی ساختمان‌ها بدست آمد. سپس با توجه به نتایج نهایی رفتارسنجی سازه‌ها و اندیس آسیب‌پذیری، ساختمان‌های مورد مطالعه با استفاده از سیستم طبقه‌بندی رانکین طبقه‌بندی شدند و با توجه به طبقه‌بندی انجام گرفته و اندیس آسیب‌پذیری، ساختمان‌های شماره ۳، ۴، ۵، ۶، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳ که نسبت به سایر ساختمان‌ها در معرض آسیب بیشتری قرار دارند، برای مدلسازی انتخاب شدند.

۱-۳ روش انجام تحقیق

به منظور تعیین کلاس ریسک آسیب‌پذیری سازه‌های مسیر مورد بررسی و تعیین سازه‌های پر خطر و مقاطع بحرانی، ابتدا سازه‌های موجود در مسیر مورد مطالعه با استفاده از روش اندیس آسیب‌پذیری^۱ امتیازبندی شدند و سپس رفتارسنجی ساختمان‌ها با استفاده از دوربین نقشه‌برداری انجام گرفته و نتایج نهایی رفتارسنجی ساختمان‌ها بدست آمد و سپس با توجه به نتایج نهایی رفتارسنجی سازه‌ها و اندیس آسیب‌پذیری، ساختمان‌های مورد مطالعه با استفاده از سیستم طبقه‌بندی رانکین طبقه‌بندی شدند و با توجه به طبقه‌بندی انجام گرفته و اندیس آسیب‌پذیری، ساختمان‌هایی که نسبت به سایر ساختمان‌ها در معرض آسیب بیشتری قرار داشتند، مشخص شده و برای مدلسازی انتخاب شدند. به منظور مدلسازی عددی مقاطع مورد نظر، از نرم‌افزار المان محدود Plaxis 3D Tunnel به علت اینکه می‌توان تغییر شکل‌های الاستو پلاستیک، آنالیز استاتیکی، آنالیز تحکیم و مسائل جریان آب زیرزمینی را در آن مدل کرد و همچنین به دلیل قابلیت مدلسازی خاک، عضو سازه‌ای، اندرکنش بین خاک و سازه و تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی پیچیده، استفاده شده است. برای بدست آوردن ابعاد مدل بهینه به منظور محاسبه دقیق منحنی نشست، تحلیل حساسیت در راستای طولی مدل انجام پذیرفت و بر اساس این تحلیل حساسیت به این نتیجه رسیده شد که میزان نشست در فاصله ۳ برابر قطر تونل از ابتدا و انتهای مدل

¹ Vulnerability Index

ایستا می‌شود. در نهایت نیز با استفاده از این مدل بهینه نشست ساختمان‌ها در مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۴-۱ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر مشتمل بر ۸ فصل تدوین شده است:

در فصل اول کلیات، اهداف و ضرورت پایان‌نامه و روش انجام تحقیق بیان شده است. در فصل دوم مروری بر مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در زمینه نشست ناشی از تونلسازی و روش‌های مختلف پیش‌بینی نشست سطح زمین اعم از روش‌های تجربی، تحلیلی، عددی و مدلسازی فیزیکی ارائه شده است. در فصل سوم روش‌های ارزیابی آسیب وارد بر سازه‌ها در اثر نشست ناشی از تونلسازی، بحث شده است. در فصل چهارم به معرفی پروژه خط یک مترو تبریز، خواص ژئوتکنیکی محل پروژه و روش حفاری پرداخته شده است. در فصل پنجم نحوه طبقه‌بندی ساختمان‌های محدوده مورد مطالعه و کلاس ریسک آسیب‌پذیری ساختمان‌های خط یک متروی تبریز ارائه شده است. در فصل ششم نتایج حاصل از روش‌های عددی با روش‌های تجربی و تحلیلی مقایسه شده است. در فصل هفتم نرم‌افزار مورد استفاده و همچنین نحوه مدلسازی عددی مقاطع مورد نظر و میزان نشست سطح زمین و سازه‌ها در این مقاطع بیان شده است. در نهایت فصل هشتم، نتایج و یافته‌های تحقیق به بحث گذاشته شده و پیشنهاداتی جهت ادامه مطالعات ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر مطالعات و تحقیقات صورت
گرفته در زمینه نشست ناشی از تونلسازی

۲ فصل دوم: مروری بر مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در زمینه نشست ناشی از تونلسازی

۱-۲ پدیده نشست

مسئله نشست احتمالی زمین در زمان احداث تونل‌های نزدیک به سطح زمین از اهمیت خاصی برخوردار است. هوک اشاره داشتند که به هنگام طراحی یک تونل کم عمق در یک توده سنگ ضعیف، طراح با یکسری مسائل مواجه می‌شود که در تونل‌های عمیق‌تر یا وجود ندارد یا از اهمیت کمتری برخوردار است. این مشکلات عبارتند از [۱]:

۱- نزدیکی به سطح زمین معمولاً سبب می‌شود که روند شکست برای توده سنگ اطراف تونل و در بالای سینه‌کار به صورت ریزش تا سطح زمین ادامه داشته باشد. این نوع گسیختگی یا پدیده مچاله شونده‌گی که اطراف یک تونل عمیق در یک توده سنگ ضعیف رخ می‌دهد متفاوت می‌باشد و هر روش تحلیلی که بکار گرفته می‌شود بایستی قابلیت تطابق با این تفاوت را دارا باشد.

۲- به خاطر پروسه شکست متفاوت، پروسه طراحی رایج "اندرکنش سنگ-سیستم نگهداری" برای این مسئله قابل استفاده نیست. روش‌های رایج برای تونل‌های کم عمق معمولاً مستلزم این فرض است که بارسنگ بر اساس وزن مرده توده سنگ تونل محاسبه می‌شود.

۳- در سنگ‌های ضعیف پایداری تونل‌های کم عمق معمولاً در برگیرنده ناپایداری در سینه‌کار و همچنین شکست در توده سنگ اطراف تونل است. متعاقباً یک تحلیل کامل از این مساله نیازمند استفاده از یک مدل عددی سه بعدی است.

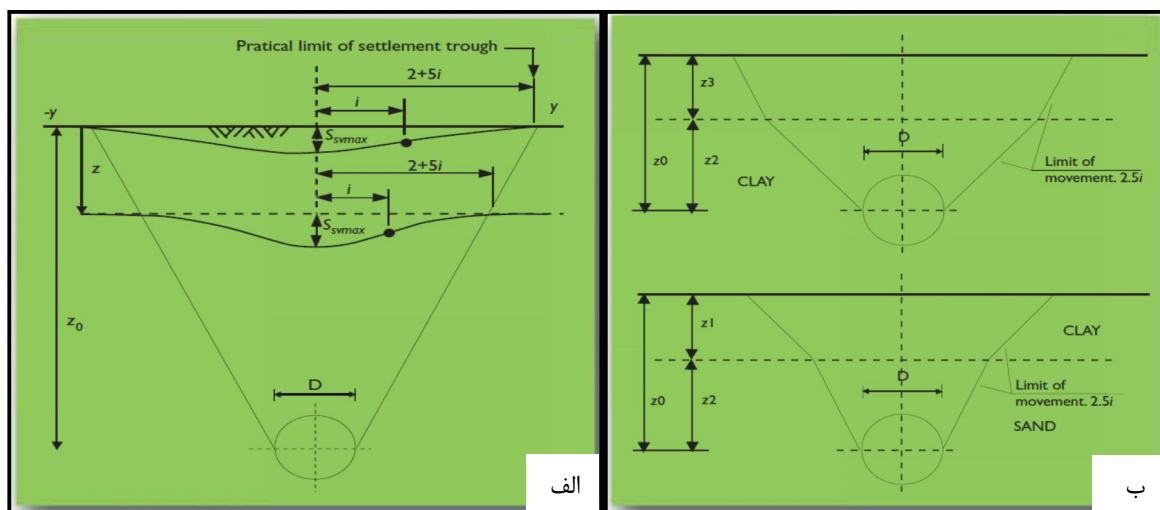
۴- توده‌سنگ‌های نزدیک سطح زمین در معرض تنش‌زدایی، هوازدهی و آسیب‌های ناشی از انفجار به عنوان نتیجه‌ای از حفاریات مجاور هستند. این مشکلات باعث تداخل در قفل‌شدگی بین ذرات سنگ شده

که نقش مهمی در تعیین مقاومت کلی و خواص دگرشکلی توده سنگ دارد. توده سنگ‌های نزدیک سطح تمایل به تغییر شکل بیشتری نسبت به توده سنگ‌های مشابه در شرایط محصورشدگی در عمق بیشتر دارند. این تغییر شکل پذیری بایستی توسط طراح تعیین و برای انتخاب پارامترهای ورودی برای هرگونه تحلیلی در نظر گرفته شود.

۱-۱-۲ فاکتورهای موثر در بروز پدیده نشست در اثر حفر تونل

۱-۱-۱-۲ شرایط زمین‌شناسی

تونل‌های کم عمق معمولاً در زمین‌های سست حفاری می‌شوند که نیاز به در نظر گرفتن ملاحظات لازم برای نصب سیستم نگهداری موقت دارد. نکته مهم در این زمین‌ها کم بودن مدت زمان خود پایداری می‌باشد که با اجرای به موقع سیستم‌های نگهداری موقت می‌توان یک طرح ایمن ایجاد کرد. وجود آب زیرزمینی و کاهش تنش منجر به ایجاد نشست زیاد و در برخی مناطق حتی ریزش می‌شود. همچنین نوع زمین نیز در انتقال نشست‌های ایجاد شده به سطح زمین موثر است. عبارتی دیگر در زمین‌های همگن شکل (۱-۲ الف) نشست در عمق به همان شکل به سطح زمین منتقل می‌شود ولی در زمین‌های ناهمگن شکل (۱-۲ ب) متفاوت می‌باشد [۲].



شکل (۱-۲): نشست منتقل شده به سطح زمین در شرایط الف) همگن ب) ناهمگن [۳]

۲-۱-۱-۲ روش حفاری

اصلی ترین اختلاف در روش های اجرا به فاصله زمانی بین حفر تونل و نصب سیستم نگهداری مربوط می شود. با استفاده از روش حفاری سپری می توان این زمان را به مقدار خیلی کم کاهش داد. به عبارتی هر چه مدت زمان بین حفاری و نصب سیستم نگهداری کاهش یابد تغییر شکل های اندکی در محیط اتفاق می افتد. از این نظر روش حفاری سپری نسبت به سایر روش ها ارجحیت دارد [۲].

۳-۱-۱-۲ عمق تونل

عمقی که تونل در آن حفر می شود یک فاکتور بسیار موثر بر روی احتمال بروز نشست در سطح زمین بشمار می آید. روشن است اگر تونل در عمق زیاد حفر شود، در این صورت حتی اثرات ریزش های عظیم و گسترده سقف ممکن است قبل از رسیدن به سطح خنثی شده و از بین برود. جابجایی هایی که در اثر حفاری تونل در اعماق مختلف ایجاد می شوند، تمایل دارند که به سطح زمین منتقل شوند. بر اساس نتیجه گیری اندازه گیری های برجا و مشاهدات، مطابق شکل (۲-۲) دو حالت برای انتقال نشست های ایجاد شده به سطح تعیین شده است [۲].

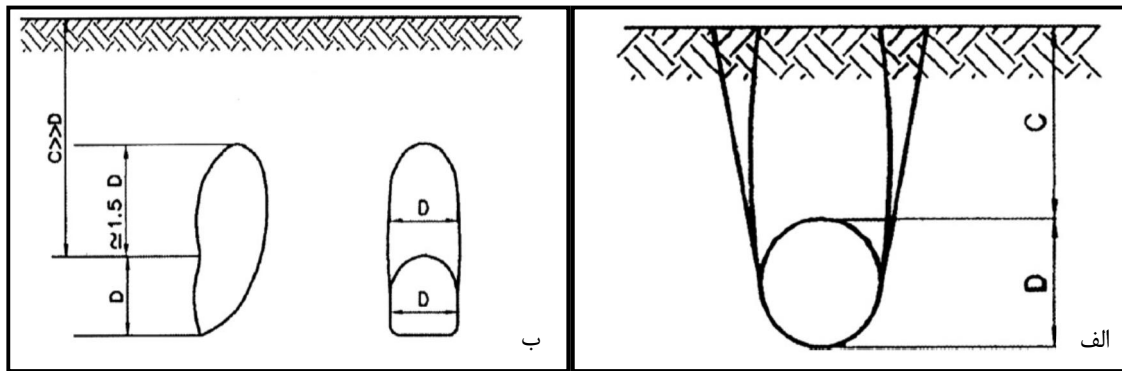
حالت اول

این حالت زمانی اتفاق می افتد که رهاسازی تنش در سینه کار اتفاق بیافتد، که این با شکل گیری زون سست شده بالای فضای حفاری شده تعیین می شود. ارتفاع این زون معمولاً $1/5$ برابر قطر تونل می باشد [۲].

حالت دوم

این حالت ممکن است زمانی اتفاق بیافتد که تونل نزدیک سطح زمین ($C/D < 2/5$) قرار گرفته باشد و تنش جانبی وارده کم باشد. این شرایط منجر به شکل گیری بلوک های سخت که با دو صفحه برشی تکی

یا صفحات برشی چندگانه می‌شود که از تونل تا سطح زمین گسترش یافته‌اند. جابجایی‌ها در سطح زمین بالای فضای حفاری شده هم اندازه با جابجایی‌های ایجاد شده در فضای حفاری شده می‌باشند. این مکانیزم رفتاری زمین عموماً منجر به جابجایی‌های افقی و عمودی می‌شود که تمایل به گسترش در سطح زمین دارند [۲].



شکل (۲-۲): حالت‌های انتقال نشست به سطح زمین (الف) حالت اول (ب) حالت دوم [۲]

۴-۱-۱-۲ ابعاد فضای حفاری

ابعاد فضای حفاری نقش مهمی در نشست سطح زمین دارد. هرچه عرض تونل بیشتر باشد، باری که سقف بلافاصله تحمل می‌کند بیشتر است. از آنجایی که بیشترین نرخ همگرایی تونل به اندازه یک برابر قطر تونل از سینه کار بروز می‌کند، مشکل کنترل همگرایی با افزایش عرض تونل افزایش می‌یابد. کارایی ابزار نگهداری موقت با افزایش اندازه تونل کاهش می‌یابد و متعاقباً نیازمند توجهات ویژه به هنگام حفر چنین تونل‌هایی در زمین‌های سست است [۲].

۵-۱-۱-۲ میدان تنش

طبیعت تنش‌های برجا یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در میزان نشست ناشی از حفاری تونل می‌باشد. در اکثر حالات، میدان تنش توسط روباره کنترل می‌شود. در بعضی مناطق وجود بعضی عوارض موجب تغییر در فشار جانبی می‌شود. البته وجود فشارهای جانبی بالا در اعماق کم بیشتر در محیط‌های

سنگی وجود دارد و کمتر در محیط‌های خاکی گزارش شده است. دلیل این امر را می‌توان به شکست سنگ و ایجاد صفحات برشی و توزیع تنش ذکر کرد [۲].

۲-۱-۲ دلایل نشست زمین در اثر حفر تونل

با توجه به آخرین بررسی‌های بعمل آمده عوامل موثر بر نشست زمین در بالای یک تونل حفر شده در خاک را بشرح زیر می‌توان ذکر کرد [۲]:

- نشست طبیعی رسوبات جوان؛
- شکل‌گیری و آرایش مجدد رس در اثر حفر تونل که باعث بروز سیکل جدید تحکیم رس می‌شود
- پایین بردن سطح آب زیرزمینی از طریق حفر شبکه چاه‌های زهکش
- شکل‌گیری و آرایش مجدد دانه‌های خاک در اثر بالا آمدن دوباره آب زیرزمینی
- عمل کردن تونل بصورت زهکش آب‌های موجود در زمین
- حرکت زمین به سمت سینه‌کار و دیوارهای حفاری شده تونل
- سست شدن توده خاک و تزریق ناقص در حین عملیات ساختمانی
- تغییر شکل و انحنای قطعات بتنی پوشش تونل.

۲-۲ نشست ناشی از حفاری مکانیزه

حرکات زمین نتیجه اجتناب ناپذیر حفاری و ساخت تونل می‌باشد. 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 سیستم نگهداری صلب که کاملاً بر تونل منطبق باشد، امکان‌پذیر نیست. از اینرو مقدار مشخصی تغییر شکل 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. اساساً نشست ناشی از سه مولفه می‌باشد [۳]:

۱- نشست‌های کوتاه مدت ناشی از حفاری تونل، که تابع عواملی نظیر:

پایداری جبهه کار تونل، نرخ پیشروی، زمان لازم برای نصب سیستم نگهداری تونل و زمان لازم برای پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری (تونلسازی مکانیزه) می‌باشد. نشست آبی در امتداد محور تونل در جلوی سینه کار تونل شروع شده و هنگامیکه تزریق دوغاب در فضای خالی پشت سر برای مقابله با نشست‌های شعاعی آبی به اندازه کافی سخت (محکم) شود، نشست‌ها متوقف می‌شوند.

۲- نشست بعلت تغییر شکل سیستم نگهداری تونل. این نوع نشست مربوط به تونل‌های با قطر بزرگ در عمق کم می‌باشد. هر چند این نوع نشست در تونلسازی مکانیزه، جائیکه بارها بخوبی پیش‌بینی شده و با طراحی صحیح سیستم نگهداری بتنی براحتی از تغییر شکل‌ها اجتناب می‌شود، نقش ناچیزی دارد.

۳- نشست بلند مدت ناشی از:

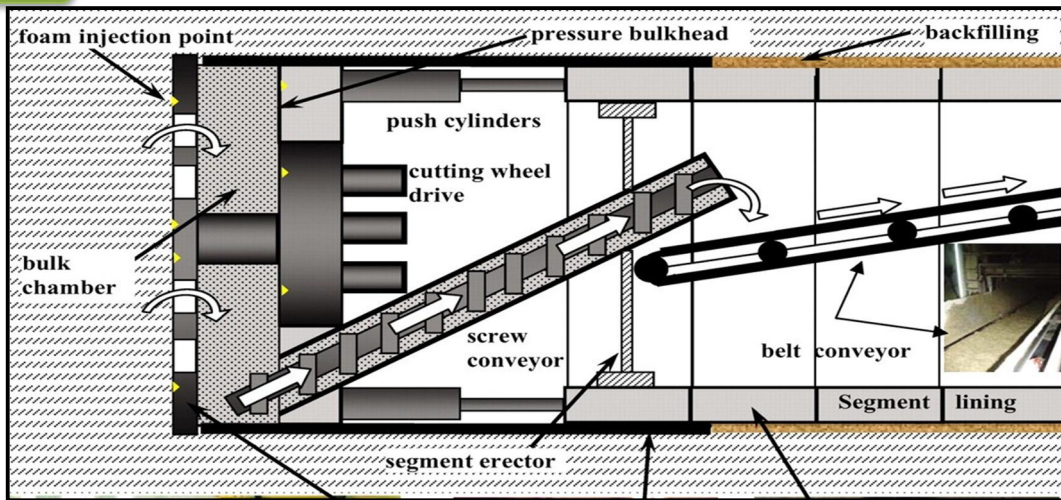
الف) تحکیم اولیه: که معمولاً در خاک‌های چسبیده و تراکم‌پذیر در طی پراکندگی فشار منفذی زیاد صورت می‌گیرد؛

ب) تحکیم ثانویه: شکل خزش خاک که به میزان زیادی کنترل شده است.

۲-۲-۱ سپرهای متعادل کننده فشار زمین^۱ (EPB)

توسعه و ساخت سپرهای متعادل کننده فشار زمین در اوایل دهه هفتاد در ژاپن آغاز شد. اولین سپر فشار تعادلی در سال ۱۹۷۴ در توکیو بکار گرفته شد. این سپر دارای قطر بیرونی ۳/۷۲ متر و توسط شرکت ژاپنی برای حفر یک تونل جمع آوری فاضلاب به طول ۱۹۰۰ متر طراحی شد. در دهه‌های اخیر استفاده از سپرهای متعادل کننده فشار زمین برای حفاری تونل‌ها در مناطق شهری به دلایل زیاد مانند کاهش نشست‌های ایجاد شده، سرعت حفاری بالا و ایمنی به یک روش متداول تبدیل شده است [۴]. نمونه‌ای از یک دستگاه متعادل کننده فشار زمین در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.

^۱ Earth Pressure Balance



شکل (۲-۳): دستگاه متعادل کننده فشار زمین [۴]

سپر متعادل کننده فشار زمین یکی از مدرنترین و پیشرفتهترین نوع دستگاه حفاری است که به علت وجود سیستم تعادل فشار زمین قادر به اجرای کار در زیر تراز آب است. در این ماشین خاکهای حفاری شده خود برای ایجاد تعادل در سینه کار به کار گرفته می شود. اصول روش تونلسازی با این روش می تواند بصورت زیر خلاصه شود:

- سینه کار تونل با چرخش کله حفر دستگاه حفاری می شود.
 - خاک حفاری شده بصورت مکانیکی به چمبر حفاری منتقل می شود.
 - با استفاده از نیروی تراست ماشین سپر، خاک حفاری شده توسط جکهای هیدرولیکی به منظور پایدارسازی سینه کار فشرده می شود. (تعادل نیرو)
 - کنترل فشار خاک در چمبر حفاری با تعدیل مقدار خاک حفاری شده و مقدار خاک تخلیه شده توسط نوار نقاله انجام می گیرد. (تعادل حجم)
 - خاک حفاری شده در چمبر حفاری بعنوان آب بند عمل می کند.
- ماشینهای تونلزنی از هر نوعی که باشند، با حفاری و پیشروی در زمینهای سست باعث ایجاد نشست می شوند. دستگاه حفاری متعادل کننده فشار زمین نیز از این قاعده مستثنی نمی باشد [۵].

۲-۱-۱ عوامل موثر بر نشست در تونلسازی مکانیزه

الف- کاهش فشار در سینه کار تونل

حفاری سینه کار تونل سبب رهاسازی تنش در سینه کار شده در نتیجه سبب افت سینه کار^۱ می شود، که در نتیجه افت سینه کار سبب نشست جلوی سینه کار می شود [۳].

ب- اضافه حفاری

اضافه حفاری تونل در جلوی سپر بمنظور راحتی پیشروی سپر. حداقل دو فاکتور زیر منجر به اضافه حفاری در جبهه کار تونل می شود: اولاً قطر کله حفار نسبت به بدنه سپر کمی بزرگ تر ساخته می شوند دلیل این کار این است که از تماس سپر با خاک جلوگیری شود تا اصطکاک بین سپر و خاک کاهش یابد. دوما اضافه حفاری در سینه کار تونل اتفاق می افتد [۳].

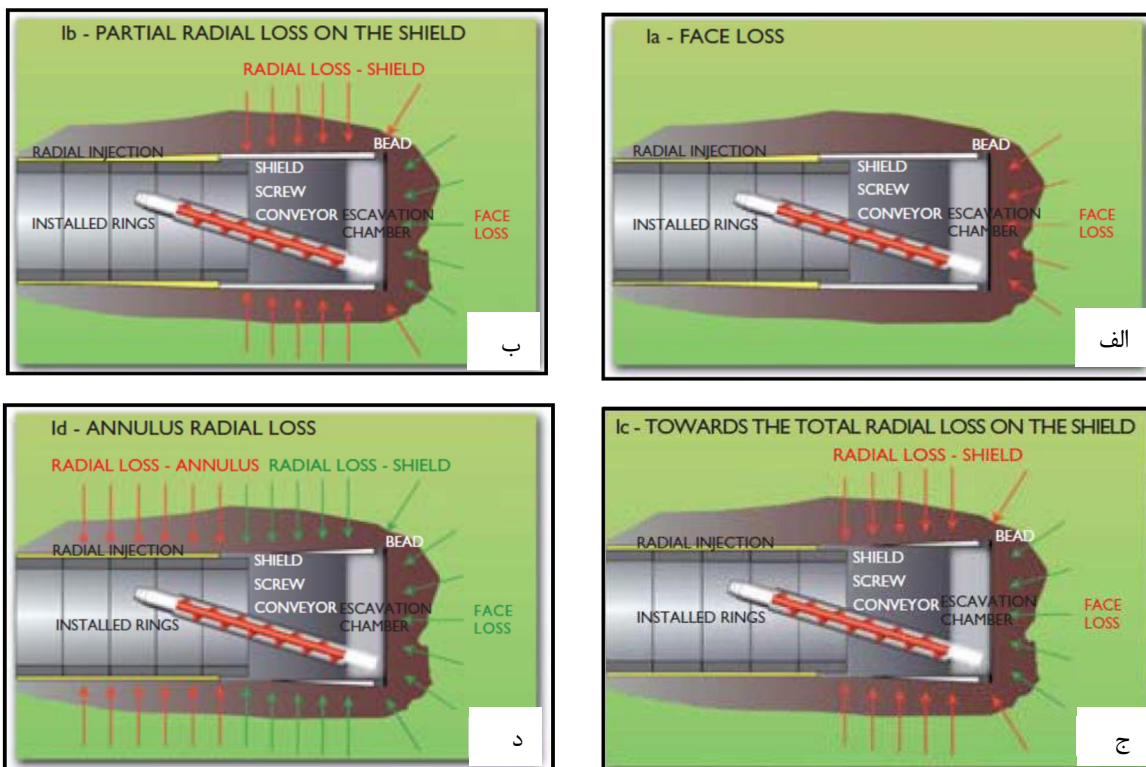
ج- فاصله بین سیستم نگهداری و مرزهای حفاری تونل

سیستم نگهداری که قطر آن نسبت به قطر سپر کمی کوچکتر می باشد، در داخل سپر نصب می شود و فضای دایروی بین سیستم نگهداری و زمین فوراً با تزریق دوغاب پر می شود. بنابراین تا زمانیکه دوغاب بطور کامل فضای خالی را پر کند و بطور کافی برای مقابله با فشار زمین سخت شود، زمین بصورت شعاعی به سمت لاینینگ همگرا می شود. مجموع افت سینه کار و افت شعاعی منجر به افت حجم کلی^۲ (V_L) می شود که از حفاری تونل ناشی می شود. همانطوریکه قبلاً اشاره شد افت حجم در عمق تونل می تواند به سمت بالا منتشر شده و تولید نشست کند. در اکثر شرایط زمین، حجم خالص نشست سطح (V_S) تقریباً برابر با افت حجم (V_L) در عمق تونل خواهد بود [۳].

بطور کلی شکل (۲-۴) عواملی را که باعث نشست در تونلسازی مکانیزه می شود را نشان می دهد.

¹ Face Loss

² Volume Loss



شکل (۲-۴): (الف) افت سینه کار، (ب) افت شعاعی بخشی سپر^۱، (ج) افت شعاعی کلی روی سپر^۲، (د) افت شعاعی حلقوی^۳

جدول (۲-۱) مقادیر مختلف V_L و k را بر اساس شرایط مختلف سینه کار و روباره نشان می‌دهد. که در آن V_L : افت حجمی کلی، K : نسبت تنش افقی به قائم و C : چسبندگی خاک اطراف تونل می‌باشد. همچنین در جدول (۲-۲) احتمال انتقال نشست از عمق به سطح زمین بر اساس شرایط مختلف سینه کار و روباره نشان داده شده است.

¹ Partial radial loss on the shield

² Towarda the total radial loss on the shield

جدول (۲-۱): مقادیر V_L و K بر اساس شرایط سینه کار و روباره [۳]

مقادیر V_L و K	توده سنگ‌های ناپیوسته و سنگ ضعیف (سینه کار)	باندهای هوازده و یا گسل - ها (سینه کار)	شرایط مختلط توده خاک و سنگ (سینه کار)	مصالح شبیه خاک (سینه کار)
مصالح شبیه خاک (روباره)	$C=0 \rightarrow V_L=0.18, K=0.13$ $C>0 \rightarrow V_L=0.15, K=0.15$	$C=0 \rightarrow V_L=1, K=0.13$ $C>0 \rightarrow V_L=0.18, K=0.15$	$C=0 \rightarrow V_L=1/2, K=0.13$ $C>0 \rightarrow V_L=1, K=0.15$	$C=0 \rightarrow V_L=1, K=0.13$ $C>0 \rightarrow V_L=0.18, K=0.15$
شرایط مختلط توده خاک و سنگ (روباره)	$K=0.15-0.17$ $V_L>0.15$	$K=0.15-0.17$ $V_L=0.15-0.18$	$C=0 \rightarrow K=0.13$ $C>0 \rightarrow K=0.15$ $V_L=0.16-0.18$	$C=0 \rightarrow K=0.13$ $C>0 \rightarrow K=0.15$ $V_L=0.15-0.17$
باندهای هوازده و یا گسل‌ها (روباره)	$K=0.15-0.17$ $V_L=0.14-0.19$	$C=0 \rightarrow K=0.13$ $C>0 \rightarrow K=0.15$ $V_L=0.16-0.12$	$C=0 \rightarrow K=0.13$ $C>0 \rightarrow K=0.15$ $V_L=0.15-0.19$	$C=0 \rightarrow K=0.13$ $C>0 \rightarrow K=0.15$ $V_L=0.14-0.18$
توده سنگ‌های ناپیوسته و سنگ ضعیف (روباره)	$K>0.17$ $V_L=0.14-0.18$	$K>0.17$ $V_L<0.14$	$K=0.15-0.17$ $V_L=0.14-0.16$	$K=0.15-0.17$ $V_L=0.13-0.15$

جدول (۲-۲): احتمال انتقال نشست به سطح زمین بر اساس شرایط سینه کار و روباره [۳]

احتمال انتقال نشست	توده سنگ‌های ناپیوسته و سنگ ضعیف	باندهای هوازده و یا گسل‌ها	شرایط مختلط توده خاک و سنگ	مصالح شبیه خاک
مصالح شبیه خاک	متوسط - بالا	بالا	بالا	بالا
شرایط مختلط توده خاک و سنگ	پایین	متوسط - پایین	متوسط	متوسط
باندهای هوازده و یا گسل‌ها	متوسط	متوسط - بالا	متوسط - بالا	متوسط - بالا
توده سنگ‌های ناپیوسته و سنگ ضعیف	نامرتب	نامرتب	متوسط - پایین	متوسط - پایین

۲-۱-۲-۲ نشست‌های ایجاد شده در اثر تونلسازی مکانیزه با سپر

الف- نشست در جلو کله حفار و بالای سینه کار

نشست در سینه کار به علت جابجایی‌های زمین در جلو و بالای سپر نسبت به فضای حفاری شده می‌باشد. جابجایی‌ها بستگی به میزان فشار نگهدارنده در سینه کار تونل، شرایط زمین و شرایط هیدرولیکی دارد [۲].

ب- نشست در امتداد سپر

نشست در امتداد سپر عمدتاً به دلایل زیر می‌باشد:

- اضافه حفاری ایجاد شده توسط برش دهنده‌های محیطی تمایل به ایجاد قطر حفاری کمی بزرگتر از سپر دارند، بنابراین اصطکاک در امتداد بدنه سپر کاهش می‌یابد.
- مشکلات هدایت سپر
- باریک شونده‌گی سپر
- زبری کله حفار که ممکن است در اثر اصطکاک و برش زمین سبب ایجاد نشست‌هایی در تاج تونل و جابجایی زمین بالای سپر شود [۲].

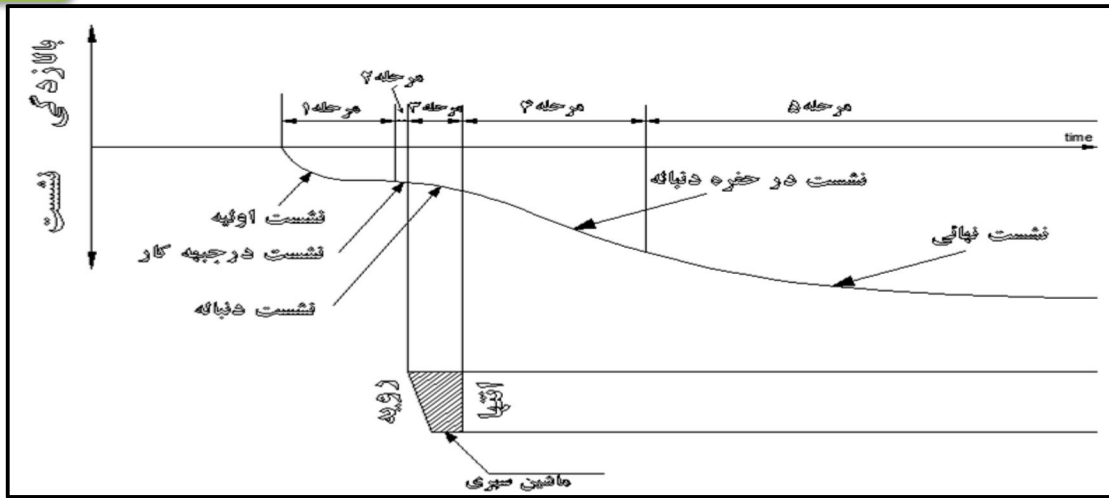
ج- نشست در نقطه تلاقی ته سپر با سگمنت‌ها

نشست در دنباله سپر به علت گپ بین زمین و قطر خارجی سیستم نگهداری می‌باشد که در اثر عوامل زیر ایجاد می‌شود:

- گپ ایجاد شده در امتداد سپر
- ضخامت بدنه سپر که بر اساس نوع سپر و قطر تونل تغییر می‌کند.
- فاصله بین قطر خارجی سگمنت و قطر داخلی سپر [۲]

به طور کلی نشست‌های ناشی از حفاری دستگاه EPB و دلایل آن را می‌توان بصورت زیر در شکل

(۵-۲) خلاصه کرد:



شکل (۲-۵) : نشست‌های ناشی از دستگاه EPB [۳۱]

مرحله ۱- نشست اولیه^۱

مرحله ۲- نشست در جبهه کار^۲

مرحله ۳- نشست دنباله^۳

مرحله ۴- نشست در حفره دنباله^۴

مرحله ۵- نشست نهائی^۵

در جدول (۲-۳) دلایل و مکانیزم نشست‌ها و همچنین تغییراتی را که هر یک از مراحل مختلف

نشست بر شرایط زمین بر جای می‌گذارند قابل مشاهده است:

جدول (۲-۳) : دلایل و مکانیزم نشست‌ها [۳۱]

نوع نشست	دلایل	تغییرات در شرایط زمین	مکانیزم شکست
نشست اولیه	کاهش تراز سطح آب	افزایش فشار موثر زمین	فشرده‌گی-نشست تحکیم
نشست در جبهه کار	فرو ریختن سینه کار، حفاری اضافی، فشار سینه کار نامناسب	آزاد شدن توزیع تنش زمین	تغییر شکل الاستیک و پلاستیک

¹ preceding settlement

² settlement at the front of the face

³ tail settlement

⁴ settlement at the tail void

⁵ succeeding settlement

ادامه جدول (۲-۳)

تراکم	دست خوردگی و بهم ریختگی	فشردگی و بهم ریختگی زمین اطراف پوسته تونل	نشست دنباله
تغییر شکل الاستیک و پلاستیک	آزاد شدن توزیع تنش زمین	ایجاد حفره در دنباله	نشست در حفره دنباله
فشردگی و نشست خزش	—	همه دلایل اشاره شده در بالا	نشست نهائی

۲-۳ روش‌های پیش بینی نشست

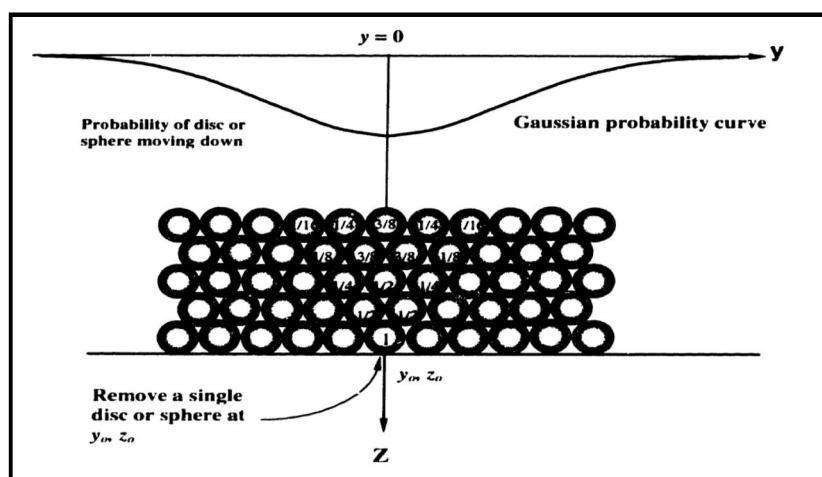
روش‌های پیش‌بینی نشست را می‌توان بطور کلی به ۵ گروه زیر تقسیم کرد:

۲-۳-۱ روش‌های تجربی

۲-۳-۱-۱ روش لیتونیسیم^۱ (۱۹۵۶)

در این روش فرض بر این است که اجزا تشکیل دهنده زمین تعداد بسیار زیادی از کره‌های هم اندازه

در سه بعد و یا دیسک در دو بعد هستند. این مدل در شکل (۲-۶) نشان داده شده است [۶].



شکل (۲-۶): پروسه نشست تصادفی (توسط اتول (۱۹۷۸) [۶]

¹ Litwinnisym

از روی این مدل گودی نشست بصورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\delta_{v(y,z)} = \frac{0.8t}{K_a} \left(\frac{Z_0 - Z}{2a} \right)^{-n} \exp \left[-0.5 \left(\frac{y}{aK_a} \right)^2 \left(\frac{Z_0 - Z}{2a} \right)^{-2n} \right] \quad (1-2)$$

این رابطه نشست ناشی از یک حفریه نازک مستطیلی به عرض $2a$ را نشان می‌دهد که در آن: t : ضخامت بسته شدگی، Z_0 : عمق مرکز تونل، K_a و n ضرایب تجربی هستند و Z نیز در جهت قائم محور مختصات را نشان می‌دهد.

$$\delta_{v,max} = \frac{0.8t}{K_a} \left(\frac{Z}{D} \right)^{-n} \quad (2-2)$$

در این رابطه D قطر تونل است. همچنین مقدار افت حجم زمین در واحد طول، V_s ، نسبت به پارامتر t ، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_s = Dt \quad (3-2)$$

با این تغییر، مقادیر ماکزیمم نشست قائم به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\delta_{v,max} = \frac{0.8V_s}{K_a D} \left(\frac{Z}{D} \right)^{-n} \quad (4-2)$$

این روش اولین روش ارائه شده برای نشست ناشی از حفاری تونل بوده و بر اساس مفاهیم آماری بنا شده است و روابط تنش-کرنش در این روش استفاده نشده است. هدف آن فقط تعیین شکل گودی نشست می‌باشد. بنابراین در پروژه‌های عملی کاربردی نداشته و این یکی از ضعف‌های این روش می‌باشد [۶].

۲-۳-۱-۲ روش پک^۱ (۱۹۶۹)

بر اساس داده‌های موجود از تعداد زیادی پروژه‌های تونلسازی، این محقق عنوان کرد که گودی نشست بالای تونل را می‌توان با دقت قابل قبولی بوسیله تابع خطا یا منحنی احتمال نرمال (معروف به منحنی گوس) بیان کرد. در اصل پک راه حل آماری لیتونیسیم را که در سال ۱۹۵۶ ارائه شده بود ساده

¹ Peck

تر کرد. بطور کلی در رابطه ارائه شده توسط پک دو پارامتر اصلی مقدار نشست ماکزیمم^۱ و پهنای گودی نشست^۲ نقش اصلی را دارا می‌باشند [۷].

$$S_{v(x)} = S_{v, \max} \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (5-2)$$

در رابطه (۵-۲)، S_v : مقدار نشست سطح در مقطع عرضی تونل، $S_{v, \max}$: نشست حداکثر، y : فاصله از محور تونل، i : مختصات نقطه عطف^۳ منحنی است. گودی نشست در نقطه عطف منحنی دارای بیشترین شیب می‌باشد که در فاصله i از مرکز تونل قرار دارد. این نقطه در تعیین معیارهای آسیب به سازه‌های سطحی بسیار مهم است [۷].

V_s در این رابطه، 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 می‌باشد. معمولاً این حجم اضافی بصورت کسری از حجم تئوریک تونل مطابق رابطه (۶-۲) تعریف می‌شود:

$$V_L = \frac{V_s}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (6-2)$$

با ترکیب روابط (۵-۲) و (۶-۲) داریم:

$$S_{v(y)} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{V_L D^2}{4i}} e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (7-2)$$

مقدار $V_L(\%)$ ، به روش اجرا و محیط در برگیرنده بستگی دارد که بر اساس روش‌های اجرای مختلف، مقادیر جدول (۴-۲) برای آن در نظر گرفته شده است [۷]. در جدول (۵-۲) می‌توان مقادیر مختلف پارامتر گودی نشست (i) ارائه شده توسط محققین مختلف را مشاهده نمود.

¹ S_{\max}

² i

³ Point of inflection

جدول (۲-۴): مقادیر V_L بر اساس روش‌های مختلف اجرا [۷]

مقدار پارامتر ($V_L\%$)	روش حفاری
۱/۵-۲/۵	روش‌های حفاری سنتی
۰/۸-۱/۵	روش‌های حفاری سپری

جدول (۲-۵): روابط تجربی برای تخمین مقدار پارامتر گودی نشست [۸]

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 تونل‌های انگلستان
Schmidt&Clough	$i / R = (z_0 / 2R)^{0.8}$	مشاهدات محلی در تونل‌های انگلستان
Reilly O & New	$i=0.43z_0 + 1.1$ خاک‌های چسبنده ($3 \leq z_0 \leq 34$) $i=0.28z_0 - 0.1$ خاک‌های غیر چسبنده ($6 \leq z_0 \leq 10$)	مشاهدات محلی در تونل‌های انگلستان
Atkinson & potts	$i=0.25(Z_0 + R)$ ماسه‌های سست $i=0.25(1.5Z_0 + 0.5R)$ رس	مشاهدات محلی و تست‌های آزمایشگاهی
Leach	$i = (0.45z_0 + 0.57) \pm 1.01$	جاهایی که اثر تحکیم قابل توجه نیستند

این روش تطابق خوبی با گودی نشست دارا می‌باشد، به شرط اینکه پارامتر گودی نشست و افت حجم بدرستی تعیین شده باشد. از معایب این روش این می‌باشد که تاثیر خصوصیات محیط در نظر گرفته نشده است.

۲-۳-۱-۳ روش اوتئو^۱ (۱۹۷۹)

این روش یک روش نیمه تجربی است که امکان تخمین نشست در امتداد عمود بر محور تونل را به ما می‌دهد. بطور کلی این روش اصلاح شده روش پک می‌باشد که در آن پارامترهای بیشتری از تونل و توده در برگیرنده بکار گرفته شده است. رابطه ارائه شده بصورت رابطه (۲-۸) می‌باشد:

$$w(y) = \psi \frac{\gamma(2a_0)^2}{E} (0.85 - \nu) e^{\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right)} \quad (۲-۸)$$

¹ Oteo

پارامتر i بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$i = a_0 \eta \left(1.05 \frac{z_0}{a_0} - 0.42 \right) \quad (9-2)$$

در این روابط، E : مدول یانگ خاک، a_0 : شعاع تونل، v : نسبت پواسون، ψ : ثابت تجربی، i موقعیت نقطه عطف منحنی گودی نشست، y : فاصله از محور تونل، γ : وزن مخصوص لایه خاک و η ثابت تجربی می‌باشد [۹].

از مزایای این روش این می‌باشد که مدول الاستسیته خاک در نظر گرفته شده است. اما این روش نسبت به روش پک کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$2-3-4 \text{ روش میر و تیلور}^1 (1982)$$

میر و تیلور بر اساس داده‌های وسیع اندازه‌گیری شده صحرایی پارامتر i را تعیین کردند. تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که نتیجه‌گیری‌های اوریلی و نیو در سال ۱۹۸۲ برای اکثر موارد ($i=0.5Z$) برای اکثر اهداف عملی چه تونل در رس نرم باشد و چه در رس سفت درست است. اگر چه برخی پراکندگی در داده‌ها بود ولی تغییرات بین $i=0.4Z$ و $i=0.5Z$ بود. بعلاوه اصطلاح $i=0.5Z$ برای تونل‌ها در رس بطور منطقی با یافته‌های فوجیتا در سال ۱۹۸۱ مطابق بود، کسی که مطالعات موردی گوناگونی در ژاپن برای ساخت تونل‌ها با روش‌های گوناگون انجام داده بود. فوجیتا نتایج اوریلی و نیو در سال ۱۹۸۲ را مبنی بر اینکه عرض پروفیل نشست سطح بالای تونل در رس به روش تونلسازی بستگی ندارد را اثبات کرد [۱۰].

$$2-3-5 \text{ روش هرزوغ}^2 (1985)$$

هرزوغ در سال ۱۹۸۵ رابطه‌ای برای تعیین نشست ماکزیمم بصورت رابطه (۲-۱۰) ارائه کرد [۱۱]:

$$S_{\max} = 0.875(\gamma_n Z_0 + \sigma_s) \left(\frac{D^2}{iE} \right) \quad (10-2)$$

در رابطه بالا E مدول الاستسیته، σ_s فشار سربار کلی و γ_n وزن مخصوص لایه‌های خاک می‌باشد.

¹ Mailr and Taylor

² Herzog

۲-۳-۲ روش‌های تحلیلی

۱-۲-۳-۲ روش ساگاستا و گونزالس^۱

در سال ۲۰۰۱، ساگاستا و گونزالس رابطه خود را تعمیم داده و رابطه‌ی (۱۱-۲) را ارائه دادند. که در رابطه بالا ε کرنش انقباضی شعاعی برابر با $\frac{u_0}{a_0}$ ، u_0 جابجایی شعاعی یکنواخت، a_0 شعاع تونل، y فاصله از مرکز تونل بر اساس عمق تونل Z_0 نرمالیزه شده است. α توان تراکم پذیری حجمی توده در برگرفته و ρ بیضوی شدگی نسبی برابر با $\frac{\delta}{\varepsilon}$ ، که δ مقدار بیضوی شدن (نسبت بین ماکزیمم مقدار جابجایی شعاعی دیواره تونل و شعاع تونل) می‌باشد [۹].

$$w(y) = 2\varepsilon a_0 \left(\frac{a_0}{Z_0}\right)^{2\alpha-1} \frac{1}{(1+y'^2)} \left[1 + \rho \frac{1-y'^2}{1+y'^2}\right] \quad (11-2)$$

این روش برای محیط‌های تراکم ناپذیر ارائه شده و مد تغییر شکل واقعی تونل را نشان نمی‌دهد.

۲-۲-۳-۲ روش ورویجیت و بوکر^۲ (۱۹۹۶)

در سال ۱۹۹۶، ورویجیت و بوکر رابطه تئوریک دیگری را ارائه دادند که در اصل اصلاح شده رابطه ساگاستا می‌باشد. نکته مهم در روابط ارائه شده توسط این محققین، در نظر گرفتن دو مد تغییر شکل تونل به نام‌های انقباض شعاعی و تغییر شکل بیضوی بود. میدان جابجایی‌های قائم و افقی به عنوان تابعی بر اساس افت شعاعی یکنواخت زمین تعریف می‌شود [۹]. راه حل فرم بسته برای تخمین جابجایی قائم به صورت رابطه (۱۲-۲) است:

$$w(y) = 4\varepsilon a_0^2 (1-\nu) \frac{z_0}{y^2 + z_0^2} - 2\delta a_0^2 Z_0 \frac{y^2 - z_0}{y^2 + z_0} \quad (12-2)$$

که در آن $\varepsilon = \frac{V_s}{4(1-\nu)}$ و V_s حجم افت زمین است که بصورت نسبت حجم گودی نشست به حجم

حفر شده در هر واحد پیشروی تعریف می‌شود [۹].

¹ Sagaseta and gonzales

² Verruijtit and Bokker

۳-۲-۳-۲ روش لاگاناتان و پولوس^۱ (۱۹۹۸)

روش لاگاناتان و پولوس (۱۹۹۸) اصلاح شده روش ورویجیت و بوکر (۱۹۹۶) است و در آن افت زمین به صورت منطقی تری در نظر گرفته شده است. این محققین برای تخمین افت زمین از پارامتر تعریف شده توسط لی و همکارانش (۱۹۹۲) استفاده کردند. بطور کلی افت زمین معادل ε_0 بصورت رابطه (۲-۱۳) تعریف شد [۱۲]:

$$\varepsilon_0 = \frac{\pi \left(a_0 + \frac{g}{2} \right) - \pi a_0^2}{\pi a_0^2} 100\% = \frac{g a_0 + g^2}{4 a_0^2} 100\% \quad (۲-۱۳)$$

در رابطه بالا a_0 شعاع تونل و g پارامتر گپ می باشد که مطابق شکل (۲-۷) و رابطه (۲-۱۴) بدست می آید:

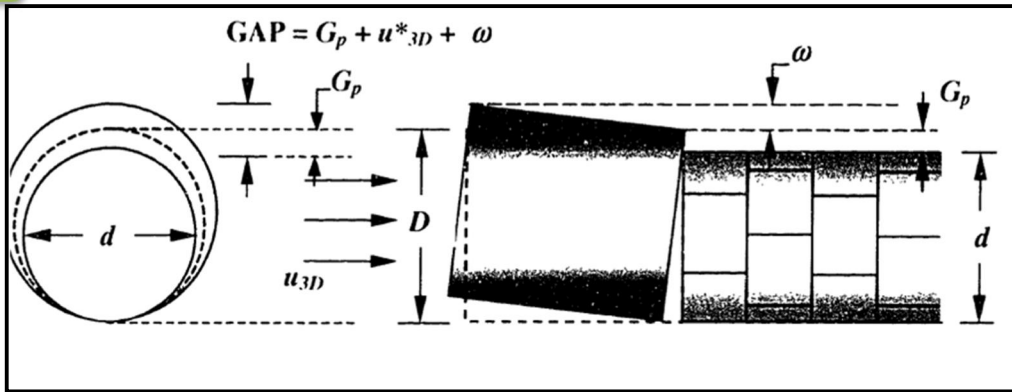
$$g = G_p + U_{3D} + \omega \quad (۲-۱۴)$$

که در این رابطه، G_p یک فاصله (گپ) فیزیکی است که بیانگر فضای خالی بین سپر و لاینینگ می باشد. پارامتر U_{3D} تغییر شکل الاستو پلاستیک سه بعدی در جبهه کار تونل است. پارامتر ω کیفیت مهارت عوامل اجرایی را در نظر می گیرد.

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 لاینینگ در دراز مدت در نظر گرفته نمی شود. جابجایی قائم سطح زمین بصورت رابطه (۲-۱۵) بیان می شود:

$$w(y) = 4(1-\nu)a_0^2 \frac{z_0}{z_0^2 + y^2} \frac{4ga_0}{4a_0^2} \exp \left[-\frac{1.38y^2}{(z_0 + a_0)^2} \right] \quad (۲-۱۵)$$

¹ Loganathan and Poulos



شکل (۷-۲): پیشروی تونل تحت تاثیر تمام مولفه‌های افت زمین شامل بیش حفاری، کجی کله حفار و مهارت کم اپراتور [۶]

۳-۳-۲ مدل‌سازی فیزیکی

تجربیات آزمایشگاهی در مورد تغییر شکل‌های مرتبط با ساخت تونل شامل ساخت یک مدل کوچک مقیاس از تونل با قطر و عمق مشخص در خاک‌های مختلف می‌باشد. سپس هنگامی که تونل حفاری می‌شود، می‌توان طبیعت تغییر شکل‌های خاک و میدان کرنش آنرا مشاهده نمود. این روش توسط اتکینسون و همکاران (۱۹۷۵)، هادسون و همکاران (۱۹۷۶)، اتکینسون و پوتز (۱۹۷۷)، کیمورا و میر (۱۹۸۱) و نوموتو و همکاران (۱۹۹۹)، آفتس (۲۰۰۱) و وینای (۲۰۰۷) مورد استفاده واقع شده است [۶].

تست‌های سانتریفوژ بر روی تونل‌های مدل انجام شده توسط کیمورا و مایر (۱۹۸۱) روشن ساخت که چگونه خصوصیات حرکت زمین تاثیر زیادی بر پایداری تونل دارد. نوموتو و همکاران (۱۹۹۹) یک ماشین تونلسازی مینیاتوری در یک تست سانتریفوژ معرفی کردند. تست آن‌ها مکانیزم حرکت زمین در جهت طولی را هنگام پیشروی سپر نشان می‌داد. اگر چه مدل پیچیده‌شان نمی‌توانست کل پروسه تونلسازی سپری را شبیه‌سازی کند. فاکتورهایی از قبیل زاویه کج شدگی و تزریق فضای خالی پشت سپر، که در میزان نشست سطحی مؤثر هستند، مدل‌سازی نشده بود. بنابراین مدل‌های فیزیکی فقط می‌توانند برای اثبات فرضیات و برای ارائه یک دید کلی از مکانیزم حرکت زمین، استفاده شوند. هدف اصلی برای استفاده

از مدل‌های فیزیکی این است که مشاهده شود خاک اطراف حفاریات چگونه با افزایش فشار خارجی و کاهش فشار داخلی تغییر شکل می‌دهند.

۲-۳-۴ روش‌های عددی

در بخش‌های قبلی روش‌های تحلیلی و تجربی پیش‌بینی نشست در سطح زمین بصورت خلاصه آورده شد. شیوه‌های رایج مربوط به موقعیت‌های زمین بکر می‌باشند. هر چند که در سازوکار مهندسی، مسائل اغلب شامل اندرکنش بین ساخت تونل و دیگر سازه‌ها می‌باشند. این قبیل وضعیت‌ها شامل سازه‌های سطحی موجود (مانند ساختمان‌ها)، سازه‌های زیر سطحی موجود (همانند تونل‌ها، پایه‌ها) یا ساخت سازه‌های زیرزمینی پیچیده از قبیل تونل‌های دوقلو و ایستگاه‌های زیرزمینی می‌باشند. روشن است که روش‌های تجربی که قبلاً ارائه شد در اینگونه موارد دارای محدودیت‌هایی هستند.

۲-۳-۴-۱ تحلیل‌های دو بعدی

ساخت تونل یک مسئله سه بعدی است. اگر چه تحلیل‌های عددی کاملاً سه بعدی، اغلب به محاسبات زیاد نیاز دارند. بنابراین حفاری تونل اغلب بصورت دو بعدی مدلسازی می‌شود. هنگام برگزیدن تحلیل کرنش صفحه‌ای برای شبیه‌سازی ساخت تونل، روش‌های متنوعی برای در نظر گرفتن تغییرات تنش و کرنش جلوی سینه‌کار تونل پیشنهاد شده است که در ادامه به اختصار به آن‌ها اشاره می‌شود.

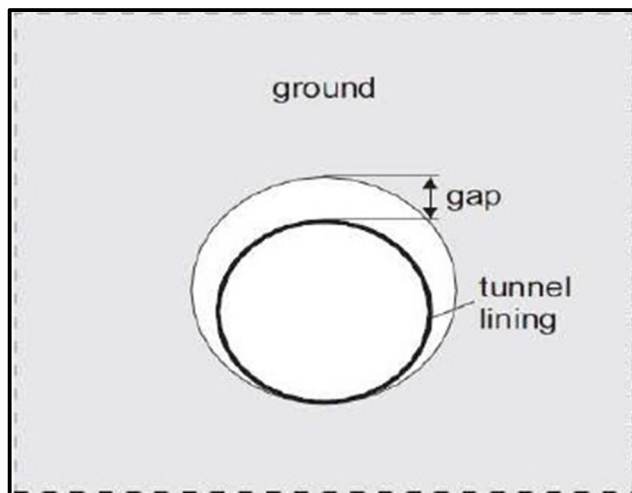
الف- روش گپ^۱

این روش اولین بار توسط روو و همکارانش^۲ (۱۹۸۳) معرفی شد. همان‌طور که در شکل (۲-۸) نشان داده شده است این روش افت زمین^۳ را به اصطلاح گپ عمودی بین لاینینگ تونل و سطح حفاری شده در نظر می‌گیرد [۱۳].

^۱ Gap method

^۲ Rowe

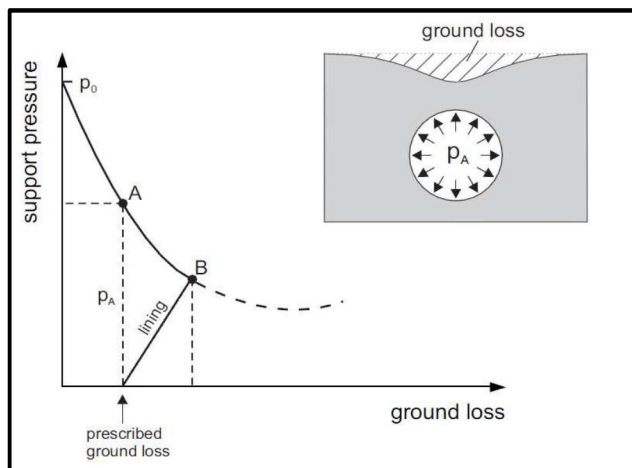
^۳ Ground loss



شکل (۸-۲): روش گپ (۱۹۸۳) [۱۳]

ب- روش کاهش تنش^۱

این روش شامل دو مرحله محاسبات می‌باشد، که شکل (۹-۲) دو مرحله محاسبات روش کاهش تنش یا کنترل افت زمین را نشان می‌دهد. تنش‌ها در داخل تونل بتدریج در مرحله اول محاسبات کاهش می‌یابد و افت زمین منتج شده بعد از هر مرحله محاسبه می‌شود [۱۳].

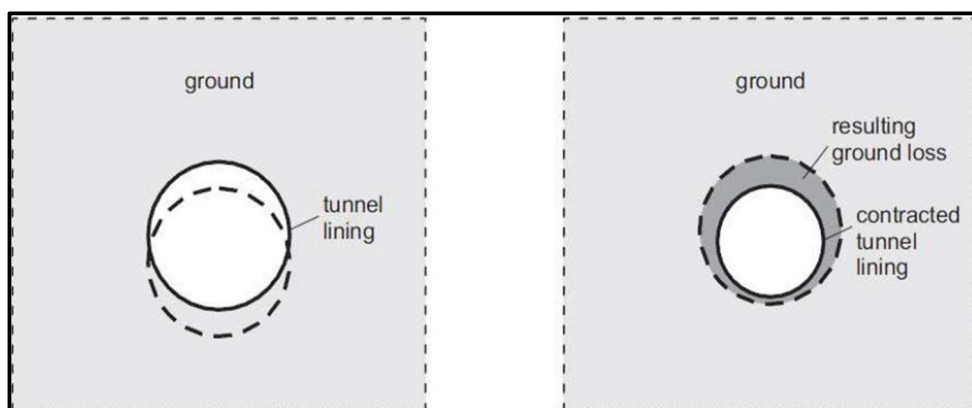


شکل (۹-۲): روش کاهش تنش [۱۳]

¹ Stress reduction method

ج- روش همگرایی^۱

این روش، روش همگرایی ورمر و برینک گرو^۲ (۱۹۹۳) نامیده می‌شود، در این روش افت زمین یا همگرایی مشخص تونل شبیه‌سازی می‌شود. این روش شامل دو مرحله محاسباتی می‌باشد که در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است. در طی مرحله اول محاسبات حفاری تونل با برداشتن المان‌های زمین داخل تونل شبیه‌سازی می‌شود، در حالیکه در همان زمان لاینینگ در آن محل قرار داده می‌شود. به محض اینکه لاینینگ تونل در طول این مرحله جابجا می‌شود، مقداری بالازدگی به علت حذف زمین داخل تونل اتفاق می‌افتد. المان‌های پوسته‌ای برای شبیه‌سازی لاینینگ ممکن است با وزن بتن ترکیب شود و این سبب تحمیل برخی نیروهای رو به پایین روی تونل شود. با این حال، وزن لاینینگ در مقایسه با توده خاک حفاری شده مقطع تونل ناچیز است و منجر به بالازدگی تونل می‌شود. در مرحله دوم محاسبات لاینینگ تونل تدریجاً همگرا می‌شود تا زمانیکه همگرایی آن با مقدار از پیش توصیف شده مطابقت می‌کند. چون صلبیت لاینینگ نسبت به صلبیت زمین بیشتر می‌باشد، همگرایی از پیش تعیین شده تونل، جابجایی شعاعی کمتر یا بیشتری را تحمیل می‌کند. این روش منجر به نتایج غیر واقعی هم برای نشست سطح و هم جابجایی‌های افقی می‌شود [۱۳].



شکل (۱۰-۲): روش همگرایی [۱۳]

¹ Contraction method

² Vermer & Brinkgreve

د- روش فشار تزریق^۱

در روش فشار تزریق شبیه‌سازی افت زمین با روشی که المان‌های روش گپ و روش کاهش تنش را ترکیب می‌کند حاصل می‌شود. مانند روش گپ، تغییر شکل زمین با قطر خارجی لاینینگ تونل محدود می‌شود و شبیه روش کاهش تنش شرایط مرزی فشار در امتداد مرزهای حفاری اعمال می‌شود [۱۴].

در رابطه با مدل‌های عددی دو بعدی ارائه شده توسط محققین مختلف برای تونلسازی به روش تعادل فشار زمین، در روش گپ (۱۹۸۳) افت حجم اولیه ناشی از حفاری و همچنین خصوصیات دوغاب تزریقی در نظر گرفته نشده بود. در روش همگرایی (۱۹۹۳)، گپ بین لاینینگ و تونل در نظر گرفته نشده بود و لاینینگ بلافاصله در محل نصب می‌شود و سپس همگرایی به لاینینگ اعمال می‌شود که این روش منجر به نتایج غیر واقعی‌تری می‌شود. در روش کاهش تنش، افت حجم اولی در نظر گرفته شده است ولی خصوصیات دوغاب تزریقی در نظر گرفته نشده بود.

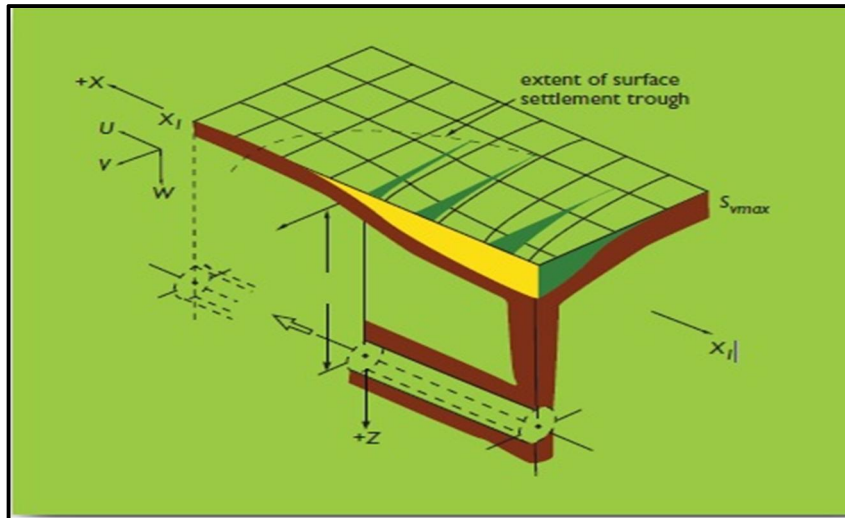
۲-۳-۴-۲ تحلیل‌های سه بعدی

روش‌های مختلفی برای مدلسازی سه بعدی ساخت تونل وجود دارد. محققین مختلف شیوه گام به گام را برای مدلسازی انتخاب نموده‌اند، که حفاری تونل با برداشتن متوالی المانهای سینه‌کار و نصب لاینینگ در فاصله‌ای مشخص از سینه‌کار تونل مدلسازی می‌شود. این فاصله مربوط به طول حفاری می‌باشد.

محققان دیگری نیز مدل سه بعدی ساخت تونل با بکار بردن روش‌های افت حجم، همانطور که در تحلیل‌های دو بعدی ارائه شد، پیشنهاد دادند. شیوه‌های دیگر برای مدل کردن جزئیات ماشین تونلسازی تزریقی یا فشار دوغابی بودند. در تحلیل‌های سه بعدی گودی نشست سطحی بصورت تصویر نشان داده شده در شکل (۲-۱۱) خواهد بود. در فاصله مشخصی از پشت سینه‌کار، نشست کوتاه مدت (ناشی از

¹ Grout pressure method

پاسخ زهکشی نشده آنی)، بخاطر پیشروی سپر به جلو، نباید افزایش یابد. خلاصه‌ای از برنامه‌های کامپیوتری اجزاء محدود سه بعدی و شرایط کاربرد آن‌ها در جدول (۲-۶) آورده شده‌اند [۷]. که در آن K_0 : نسبت تنش افقی به قائم، D : قطر تونل و Z_0 : عمق قرارگیری تونل می‌باشد.



شکل (۲-۱۱): هندسه گودی نشست القایی در اثر تونلسازی [۳]

محقق زیادی اشاره کردند که پروسه ساخت تونل یک مسئله سه بعدی بوده، و بدین سبب برای مدل کردن ساخت تونل باید تحلیل‌های سه بعدی بکار گرفته شود. هر چند بدلیل محدودیت در زمان محاسبات، تحلیل‌های دو بعدی استفاده گسترده‌ای دارند. تحلیل‌های سه بعدی نام برده شده در جدول (۲-۶) بر روی جنبه‌های مختلف از قبیل: تکنیک تونلسازی، شرایط تنش اولیه یا آنیزوتروپی خاک تمرکز کردند.

جدول (۲-۶): خلاصه‌ای از جزئیات تحلیل‌های اجزاء محدود سه بعدی [۷]

برنامه	مش‌بندی یا شبکه		Z_0 (m)	D (m)	K_0	مواد	محقق
	طول(متر)	عرض(متر)					
	۵۹	۳۵	۱۵/۲	۶/۷	۰/۸	الاستیک غیر خطی	Katzenbach & Breth(1981)
CRISP	۵۰	۴۰	۲۵	۸	۱	الاستیک غیر خطی - کاملا پلاستیک	Desari et al. (1996)
ABAQUS	۹۵	۸۰	۲۵	۸/۶	۱/۵	الاستیک-کاملا پلاستیک-آنیزوتروپ	Tang et al. (2000)

ادامه جدول (۲-۶)

PLAXIS	۱۰۰	۵۵	۲	۸	۰/۶۶	الاستیک-کاملا پلاستیک	Vermeer et al. (2002)
FEM3D	۳۷	۱۹/۵	۸	۲/۵	۰/۸۵	الاستیک-کاملا پلاستیک-آنیزوتروپ	Lee & Rowe (1991)
ABAQUS	۵۴	۶۰	۹	۶	۱-۰/۵	الاستیک	Guedes & Santos Pereira(2000)
CRISP	۵۱	۲۲	۱۵/۷	۳/۷۶	۱/۵-۰/۵	الاستیک خطی-کاملا پلاستیک	Dolezalova(2002)
ABAQUS	۱۰۱/۲۵	۷۵	۲۲/۵	۹	۱/۵-۰/۵	الاستیک-کاملا پلاستیک	Lee & Ng (2002)
FLAC3D			۲۵	۹/۸	۰/۴۳-۰/۳۶	الاستیک-کاملا پلاستیک	Dias et al.

۲-۳-۵ تحلیل شبکه عصبی^۱

یکی از روش‌های پیش‌بینی نشست در اطراف تونل‌ها، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. هر چند که مبانی طراحی شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم عصبی در بدن موجودات زنده می‌باشد، لیکن باید توجه داشت که این شبکه‌ها سعی در حفظ پیچیدگی مغز در ساختار خود را ندارند و فقط اصول کلی و پایه‌ای خود را اعم از علم بیولوژی سلول‌های عصبی موجودات زنده می‌گیرند. شبکه‌های عصبی مصنوعی با وجود اینکه با سیستم عصبی طبیعی قابل مقایسه نیستند، ولی ویژگی‌هایی دارند که آنها را در بعضی از کاربردها مانند تفکیک الگو، رباتیک و بطور کلی در هر جا که نیاز به یادگیری خطی و یا غیر خطی باشد ممتاز می‌نماید.

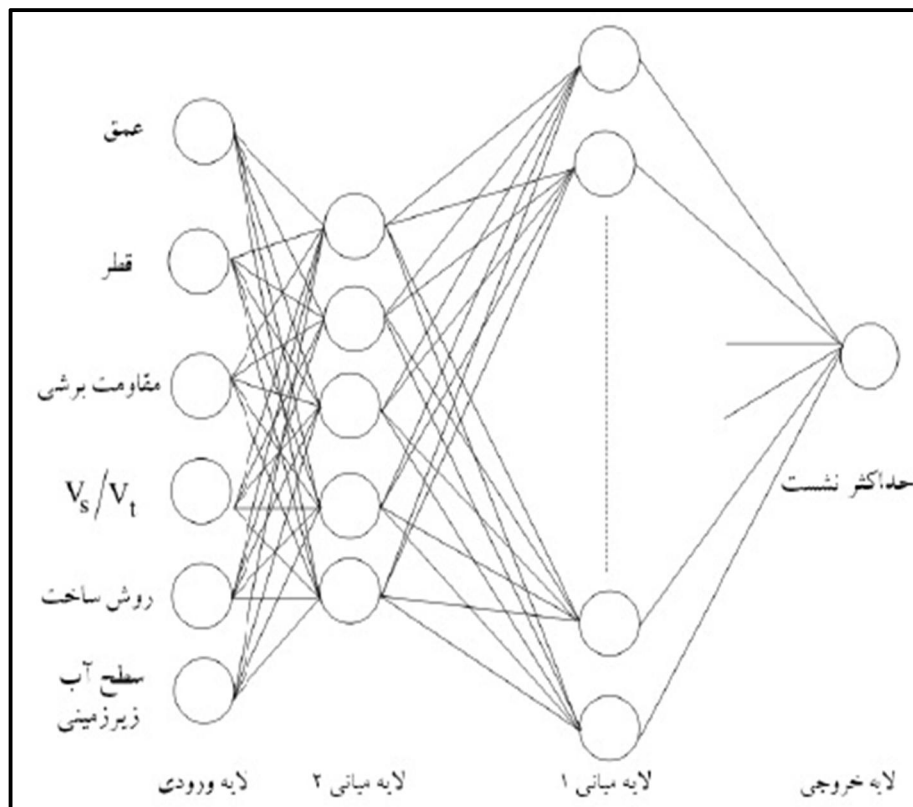
برای پیش‌بینی نشست و حرکات زمین در اثر تونلسازی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی باید داده‌هایی از موارد قبلی را جمع‌آوری کرد. ابتدا شبکه را با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی مناسب آموزش داده، سپس تست کرده و در نهایت با استفاده از یک سری پارامترهای ورودی، خروجی مورد نظر

¹ Natural Network Analysis

را تخمین می‌زنند. در یک مطالعه از مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی حرکات زمین اطراف دو تونل، تونل تندرو هیترو در لندن و دیگری یک تونل فاضلاب در بانکوک، استفاده شده است [۱۵].

پارامترهای استفاده شده در این مطالعه شامل قطر تونل (D)، عمق محور تونل از سطح زمین (Z) و افت حجم القا شده در اثر تونلسازی در هر متر (V_s) می‌باشند. خصوصیات آب در زمین و روش‌های ساخت نیز به عنوان ورودی مورد نیاز شبکه در آن در نظر گرفته شده‌اند. سطح آب زیرزمینی به دو طبقه تقسیم شده است. سطح آب بالاتر از لبه تونل را با عدد ۱ و سطح آب پایین‌تر از لبه تونل را با عدد ۲ در نظر گرفته‌اند. بطور مشابهی روش‌های ساخت را در سه دسته ۱ و ۲ و ۳، بترتیب مربوط به سپر با حفر دستی، سپر مکانیزه و سپر نیمه مکانیزه (با نگهداری هوای فشرده)، طبقه‌بندی نموده‌اند. برای خصوصیات مقاومتی خاک نیز، مقاومت برشی زهکشی نشده (C_{II}) و زاویه اصطکاک داخلی در دسترس بوده و یا در موارد لزوم با استفاده از روابط تجربی از عدد نفوذ استاندارد (N) تخمین زده شده‌اند.

متغیرهای ورودی شامل عمق محور تونل، نسبت قطر به عمق تونل (D/Z)، وزن مخصوص خاک و مقاومت برشی زهکشی نشده (C_{II}) و پارامتر خروجی حرکت افقی زمین می‌باشند. شبکه عصبی با ۴ نرون ورودی، ۳ نرون در لایه میانی اول، ۵ نرون در لایه میانی دوم و ۱ نرون خروجی برای این مورد تنظیم شده است. در مجموع ۲۶ پارامتر از متغیرهای ورودی و خروجی استفاده شده است. شبکه با ۱۳ الگو آموزش داده شده و با همان تعداد الگو نیز تست شده است. شکل (۲-۱۲) نمونه‌ای از یک شبکه عصبی برای پیش‌بینی حداکثر نشست در تاج تونل را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۲): ساختار شبکه عصبی استفاده شده برای پیش‌بینی حداکثر نشست در تاج تونل [۱۵]

۲-۴ نتیجه‌گیری

در این فصل تعدادی از تحلیل‌های ساخت تونل در شرایط بدون حضور سازه توسط محققین مختلف ارائه شده است. با توجه به روش‌های ارائه شده توسط محققین مختلف برای پیش‌بینی نشست، نتایج زیر را می‌توان استنتاج نمود:

- اکثر تحقیقات مربوط به گودی نشست عرضی بوده است. بر اساس داده‌های میدانی، راه‌حل تجربی ارائه شده توسط پک (۱۹۶۹) در ترکیب با پارامتر گودی نشست پیشنهادی توسط اوریلی و نیو (۱۹۸۲) مناسب بوده و در عمل برای پیش‌بینی گودی نشست سطحی ناشی از تونلسازی سپری، بیشتر استفاده می‌شود. اگر چه محدودیت‌های روش‌های تجربی این است که نیازمند شناسایی نشست حداکثر δ_{max} بوده که از قرائت ابزار دقیق، فقط بعد از عبور سپر بدست آمده و یا از افت زمین (V_L/\cdot) تخمینی پیش‌بینی

می‌شود. از آنجا که نشست حداکثر به پنج مولفه افت زمین (یعنی سینه‌کار، بیش حفاری، کج شدگی، آسفتگی زمین و فضای خالی پشت سپر) بستگی دارد، پیش‌بینی مقدار افت حجم بخصوص در تونلسازی (EPB) بسیار مشکل است. از اینرو برای پیش‌بینی صحیح پروفیل نشست سطحی همیشه نیاز است که از راه‌حل‌های دیگر، نشست حداکثر تعیین شود و یا به یک قضاوت خوب در مورد انتخاب مقدار افت زمین نیاز است. این موضوع نیازمند بررسی جنبه‌هایی از قبیل تکنیک‌های تونلسازی، کنترل عملیات، پیکربندی تونل و شرایط زمین می‌باشد.

- راه‌حل‌های پیشنهادی توسط ورویجت و بوکر (۱۹۹۶) در اکثر موارد با اندازه‌گیری‌های میدانی مطابقت ندارند. این راه‌حل‌ها توسط گونزالس و ساگاستا (۲۰۰۱) اصلاح شده و آن‌ها توانستند بهتر از ورویجت و بوکر (۱۹۹۶) با اندازه‌گیری‌های میدانی تطابق کنند. اگر چه استفاده از راه‌حل‌ها، ممکن است نیاز به یک پروسه آزمون - خطا برای انتخاب پارامتر شعاعی یکنواخت مناسب ϵ و پارامتر بیضوی شدن δ داشته باشد. بنابراین لاگاناتان و پولوس (۱۹۹۸)، راه‌حل ورویجت و بوکر (۱۹۹۶) را با حذف پارامتر δ و انتخاب پارامتر گپ (gap)، بمنظور ارائه مدل واقعی‌تری از تونلسازی سپری، اصلاح کردند. بر اساس نتایج، مدل آن‌ها گودی نشست سطحی باریک‌تر نسبت به راه‌حل‌های اصلی می‌دهد. اگر چه منحنی پیش‌بینی آن‌ها تطابق خوبی با بعضی نتایج موارد گذشته دارد. اما همچنان نیازمند انتخاب پارامتر گپ، بعنوان تابعی از فضای خالی فیزیکی واقعی، یک پارامتر تغییر شکل مجازی در سینه کار و یک فاکتور مهارت پرسنل کاری داشت تا با منحنی نشست واقعی تطابق داشته باشد. همه این فاکتورها پارامترهای تجربی هستند که ثابت نبوده و از مقطعی به مقطع دیگر، بسته به عملیات اجرایی سپر و همچنین شرایط زمین، تغییر می‌کنند.

- اگر چه پیش‌بینی حرکات زمین بر اساس روش اجزاء محدود یا دیگر روش‌های عددی، برای مشخص نمودن فرم کلی نشست مفید می‌باشد، اما محدودیت‌های زیادی هم دارند. تحلیل‌های دو بعدی

برای مدلسازی رفتار سه بعدی تونلسازی سپری واقع بینانه نبوده و هنوز نمی‌توانند پیش‌بینی‌های خوبی از گودی نشست داشته باشند. برای بهبود این محدودیت‌ها، تحلیل‌های اجزاء محدود سه بعدی انتخاب می‌شود (هر چند هزینه و زمان مورد نیاز برای تحلیل‌های کاملاً سه بعدی زیاد هستند). بعلاوه مدل‌های سه بعدی نمی‌توانند همه جنبه‌های رفتار تونلسازی سپری، که خیلی پیچیده است، را در بر بگیرند. از اینرو، عملاً استفاده از روش اجزاء محدود هنوز نسبتاً محدود است.

- همه مدل‌های آزمایشگاهی راه‌حل پیشنهادی توسط پک (۱۹۶۹) را تأیید نموده که شکل گودی نشست سطحی با منحنی احتمالاتی نرمال مطابقت خوبی داشت. فقط نقطه عطف یا پارامتر گودی تا حدودی متفاوت می‌باشد.

به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی از تمامی روش‌های ارائه شده می‌توان گفت که افت حجم اولیه و خصوصیات دوغاب تزریقی بین مرزهای حفاری و لاینینگ در هیچ کدام از روش‌ها بطور صحیح در نظر گرفته نشده است.

فصل سوم

ارزیابی آسیب وارد بر سازه‌ها در اثر

نشست سطح زمین

۳ فصل سوم: ارزیابی آسیب وارد بر سازه‌ها در اثر نشست سطح زمین

۱-۳ مقدمه

توسعه سیستم حمل و نقل شهرها اغلب نیاز به حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی دارد که ناگزیر این عملیات منجر به حرکت زمین می‌شود. باید به طور دقیق این مطلب بررسی شود که آیا مقدار این نشست در حدی است که باعث صدمه زدن به سازه‌های مجاور شود. برای ارزیابی این مطلب می‌بایست میزان نشست ناشی از عملیات تونلسازی تخمین زده شده و با توجه به نوع سازه میزان صدمات احتمالی تشخیص داده شود. برای تخمین این مقدار روش‌های متعددی وجود دارد، مثلاً روش‌های تجربی را می‌توان نام برد که معمولاً از آن‌ها در پیش‌بینی نشست در حالت سطح زمین بدون حضور سازه استفاده می‌شود. با توجه به اینکه حضور خود سازه‌های سطحی میزان نشست ناشی از تونلسازی را تغییر می‌دهند، چندان نمی‌توان به این روش‌ها اعتماد کرد [۱۶].

۲-۳ پیش‌بینی آسیب وارد بر سازه‌ها

پیش‌بینی آسیب وارده به ساختمان‌ها در اثر حرکت زمین ناشی از حفاری، یکی از ملاحظات مهم در طراحی تونل‌ها در مناطق متراکم شهری است. در طراحی‌ها یا باید یک سیستم نگهداری مستحکم طراحی شود که از تغییر شکل زمین و در پی آن از آسیب به سازه‌های مجاور جلوگیری کند و یا یک تعادلی بین هزینه سیستم نگهداری سخت‌تر و هزینه تعمیر صدمات وارد بر سازه‌ها برقرار شود. در هر کدام از این حالات باید میزان حرکت زمین پیش‌بینی شود. اگر از دید عملی به این قضیه نگاه شود، یک طراح سعی دارد که از صدمات وارد بر جزئیات معماری ساختمان که قبل از صدمات ساختاری ایجاد می‌شود، جلوگیری به عمل آورد. روش‌های متنوع زیادی در ارتباط با صدمات ساختمان‌ها در اثر حرکت زمین وجود دارد. تعدادی از این روش‌ها بر اساس حرکت ناشی از نشست سازه در اثر وزن خود می‌باشند و در

تغییر شکل ناشی از حفر یک تونل از سختی سازه صرف نظر شده است. دیگر روش‌ها سعی دارند بر مدهای مختلف تغییر شکل تمرکز کنند، ولی در ارائه تاثیر مناسب روی سازه‌ها ناتوان هستند. روش‌های تئوریکی جدیدی وجود دارد که تا حدودی نقایص این روش‌ها را بهبود می‌بخشند. روش تیر ورقه‌ای که در ارزیابی صدمات ساختمان‌ها در اثر حفاری معرفی شده است نمونه‌ای از این روش‌ها می‌باشد. این روش از ساده سازی‌های معمول در روش‌های تجربی استفاده نکرده ولی به محاسبات سنگین یک تحلیل با جزئیات کامل اجزاء محدود نیز نیاز ندارد [۱۶].

۳-۳ بررسی آسیب وارد بر سازه‌ها

۱-۳-۳ فرایند ارزیابی ریسک آسیب برای ساختمان‌ها

فرایند ارزیابی ریسک آسیب برای ساختمان‌ها در اثر تونلسازی عمدتاً شامل دو گروه فعالیت می‌باشند

[۳]:

الف) برداشت شرایط ساختمان‌ها (BCS)^۱:

بررسی شرایط ساختمان‌ها قبل از ساخت تونل، در طول ساخت تونل و بعد از ساخت تونل

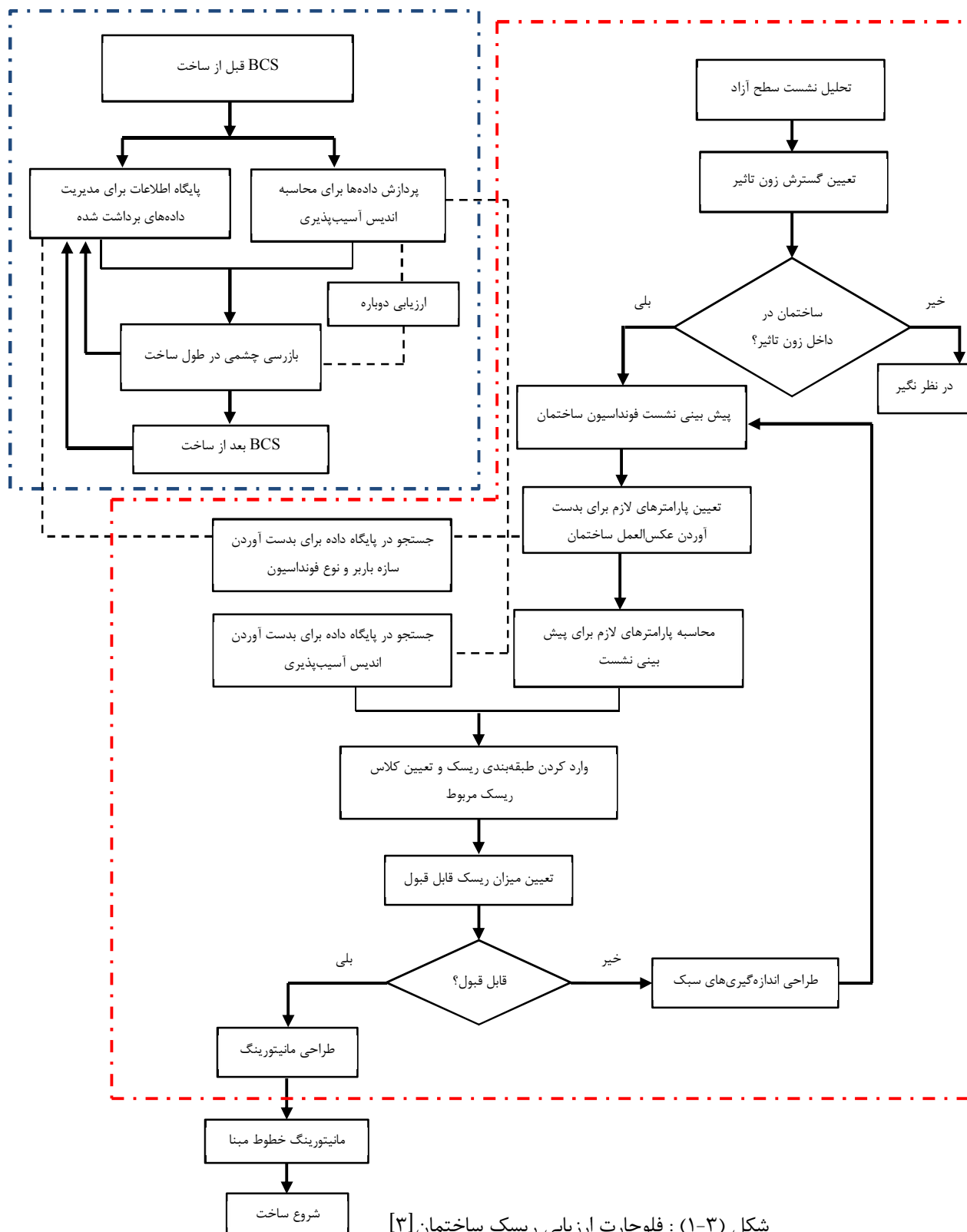
ب) ارزیابی آسیب وارد بر ساختمان‌ها (BRA)^۲:

برای تخمین آسیب‌های منتظره بالقوه بر اساس پیش‌بینی نشست‌ها و اندیس آسیب‌پذیری

ساختمان‌ها روش کلی در شکل (۱-۳) نشان داده شده است و شامل مراحل زیر می‌باشد:

¹ Building Condition Survey

² Building Risk Assessment



شکل (۳-۱): فلوچارت ارزیابی ریسک ساختمان [۳]

الف- بررسی شرایط ساختمان (BCS)

بررسی شرایط تمامی ساختمان‌ها در داخل زون تاثیر عملیات زیرزمینی باید شامل مراحل مجزای

بررسی به منظور بررسی معایب باشد. که این مراحل بصورت زیر نام‌گذاری شده‌اند:

- قبل از ساخت

- در طول ساخت

- بعد از ساخت

برای بررسی‌های مرحله قبل از ساخت، فعالیت‌ها برای هر ساختمان مجزا بر روی موارد زیر متمرکز

خواهد شد:

۱- تحقیقات مربوط به ثبت املاک به منظور جمع‌آوری اطلاعات در مورد موارد نظیر:

سن ساختمان، نقشه‌های پروژه، نوع و عمق فونداسیون، تعداد طبقات، نوع سازه‌های باربر، تاریخچه

کارهای مرمت قبلی و افزایش طبقات اضافی. تحقیقات همچنین برای تعیین اینکه آیا ساختمان در لیست

میراث فرهنگی و تاریخی قرار دارد یا نه انجام خواهد شد.

۲- بررسی شرایط ظاهری ساختمان:

تمام قسمت‌های قابل رویت ساختمان بررسی خواهد شد، مشاهده ترک‌ها، لیست معایب و عکس‌ها

ثبت خواهد شد. برای ارزیابی هر ساختمان، گنجاندن بررسی طبقات زیرزمین و سقف و همچنین بررسی

طبقات میانی برای ساختمان‌هایی که در معرض ریسک خطر بالایی قرار دارند معمول می‌باشد. در بعضی

موارد بررسی نوع و شرایط فونداسیون مطلوب می‌باشد. در طول ساخت، ثبت شرایط موقتی خصوصیات،

تهیه لیست جدید معایب، تهیه گزارش مقایسه‌ای برای هر یک از ساختمان‌ها جایی که آسیب‌های قابل

رویت گزارش شده است، معمولاً ضروری می‌باشد. نتایج BCS قبل از ساخت برای ارزیابی اندیس

آسیب‌پذیری ساختمان‌های بررسی شده استفاده خواهد شد. برای بیان آسیب‌پذیری از اندیس

آسیب‌پذیری (I_v) که از تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده در طول فعالیت BCS با توجه به قضاوت‌های مهندسی انجام می‌گیرد، استفاده می‌شود [۳].

ب- ارزیابی ریسک ساختمان (BRA)

به منظور تعیین کلاس آسیب مخصوص برای ساختمان‌ها، تعیین نوع آسیب ساختمان‌ها مفید می‌باشد. سه کلاس آسیب عمومی مورد قبول به صورت زیر می‌باشند:

۱- ظاهری و نمایی

این آسیب‌ها به ترک‌های کوچک ایجاد شده در سازه‌ها که عمدتاً دیوارهای داخلی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، مرتبطند.

۲- کاربردی یا تعمیرپذیری

مربوط به خسارات قابل تعمیر سازه مانند درها، پنجره‌ها و غیره می‌باشند که تمامیت سازه را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد و با ابزارهای دقیق نصب شده می‌توان این موارد را شناسایی کرد.

۳- پایداری

این آسیب‌ها به ترک‌ها و تغییر شکل‌های بیش از ظرفیت تحمل سازه مرتبطند و می‌توانند منجر به ریزش بخشی از ساختمان و یا کل آن شوند [۳].

۲-۳-۳ طبقه‌بندی ساختمان‌ها

۱-۲-۳-۳ روش اندیس آسیب‌پذیری

برای بیان آسیب‌پذیری از اندیس آسیب‌پذیری (I_v) که از تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده در طول فعالیت BCS با توجه به قضاوت‌های مهندسی انجام می‌گیرد، استفاده می‌شود. نحوه محاسبه این اندیس در جدول (۱-۳) نشان داده شده است.

جدول (۱-۳): نحوه محاسبه اندیس آسیب‌پذیری (I_v) [۳]

نام پروژه		کد ساختمان	
محاسبه اندیس آسیب‌پذیری (I_v)			
الف) رفتار سازه‌های ساختمان			
	ویژگی	اندیس	
		L.T	S.T
۱. اجزاء افقی سازه			
	۱.۱. سازه چوبی	۶	
	۲.۱. بتن مسلح	۰	
	۳.۱. سازه ترکیبی	۳	
۲. اجزاء قائم سازه			
	۱.۱.۲. اجزاء بنایی	۶	
	۱.۱.۲. اجزاء فلزی	۰	
	۲.۱.۲. اجزاء بتن مسلح	۳	
	۳.۱.۲. اجزاء ترکیبی	۴	
۳. فونداسیون‌ها - منبع اطلاعات			
	۱.۳. مستقیم (نقشه‌ها، پیمانکار)	۰	
	۲.۳. غیر مستقیم (ساکنان، ساختمان‌های مشابه و ...)	۴	
۴. نوع نوسازی			
	۱.۴. نامعلوم	۲	
	۲.۴. افزایش ورودی‌ها در نما (یا دیوارهای باربر)	۶	
	۳.۴. تغییرات به منظور حفاظت روش ساخت و ساز	۰	
	۴.۴. تغییرات به منظور بهبود روش ساخت و ساز	۳	

		۵	۵.۴. تحکیم (سازه‌های باربر یا فونداسیون‌ها)
		۴	۶.۴. افزایش طبقات
		۰	۷.۴. کارهای داخلی کوچک
			وضعیت کارهای نوسازی (ضریب تصحیح)
		۱	انجام شده یا در دست انجام
		۰	طراحی شده
		۱	۵. وجود طبقات زیرزمین
		۰	۱.۵. خیر
		۳	۲.۵. بلی

مجموع قسمت الف

ب) جهت‌گیری و موقعیت ساختمان

مقدار فرضی		اندیس		ویژگی
		L.T	S.T	
۱. جهت‌گیری				
		۱۰	۵	۱.۱. $L1/L2 < 0.5$
		۶	۶	۲.۱. $0.5 < L1/L2 < 2$
		۵	۱۰	۳.۱. $L1/L2 > 2$
۲. تاثیر گروه ساختمان				
		۱۵		۱.۲. نوع اول ($L1/L2 < 2D$)
		۵		۲.۲. نوع دوم ($L1/L2 > 2D$)
		۱۰		۳.۲. نوع سوم ($L1 < 2D, L2 > 2D$)
		۱۰		۴.۲. نوع چهارم ($L1 > 2D, L2 < 2D$)
		۷	۰	۵.۲. ساختمان‌های گروه موازی با محور تونل
		۰	۷	۶.۲. ساختمان‌های گروه عمود بر محور تونل
۳. موقعیت ساختمان نسبت به تونل				
		۱		۱.۳. $x/D < 2$
		۰.۵		۲.۳. $1 < x/D < 3$
		۰		۳.۳. $x/D > 3$

مجموع امتیاز قسمت ب

ج) رفتار کاربری ساختمان

مقدار فرضی		اندیس		ویژگی
------------	--	-------	--	-------

		L.T	S.T	۱. نوع استفاده ساختمان
		۱۰		۱.۱. ساختمان بسیار حساس (بیمارستان، ساختمان تاریخی، ساختمان با وسایل حساس، بنای یاد بود)
		۵		۲.۱. موارد دیگر
		۰		۳.۱. ساختمان با حساسیت پایین
مجموع امتیاز قسمت ج				
د) خصوصیات معماری ساختمان				
	مقدار فرضی	اندیس		ویژگی
		L.T	S.T	۱. میراث فرهنگی-تاریخی
		۰		۱.۱. خیر
		۱۲		۲.۱. بلی
۲. دیوارهای غیر باربر داخلی				
		۱		۱.۲. چوبی
		۴		۲.۲. آجری
		۳		۳.۲. زاموسقه
		۲		۴.۲. شیشه و آلومینیوم
۳. نمای خارجی				
		۴		۱.۳. آجر تاریخی
		۳		۲.۳. آجر خارجی
		۲		۳.۳. گچ
		۱		۴.۳. غیره
مجموع امتیاز قسمت د				
ه) وضعیت ساختمان				
	مقدار فرضی	اندیس		ویژگی
		L.T	S.T	۱. شرایط ظاهری کلی
		۰		۱.۱. خوب
		۴		۲.۱. متوسط
		۸		۳.۱. بد
۲. علائم نشست در نواحی مجاور				
		۴		۱.۲. بلی
		۰		۲.۲. خیر
۳. وضعیت ترک‌ها				
		۸		۱.۳. ترک‌های بزرگ و الگوهای گسترده

		۵	۲.۳. ترک‌ها و برخی الگوها
		۳	۳.۳. ترک‌های ریز منفرد
مجموع امتیاز قسمت ه			

شرح علائم و اختصارات

L₁: طول متوسط ساختمان در راستای محور تونل
 L₂: طول متوسط ساختمان در جهت عمود بر محور تونل
 S.T: اندیس آسیب‌پذیری کوتاه مدت
 L.T: اندیس آسیب‌پذیری بلند مدت
 X: فاصله ساختمان از محور تونل
 D: قطر تونل

طبقه‌بندی ریسک آسیب‌پذیری توسط رانکین و بولند بر اساس اندیس آسیب‌پذیری در جدول (۲-۳)

و (۳-۳) آورده شده است.

جدول (۲-۳): طبقه‌بندی آسیب رانکین برای مترو پورتو با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری [۳]

اندیس آسیب‌پذیری ساختمان‌ها										کلاس آسیب
شدید		متوسط		کم		پایین		قابل چشم‌پوشی		
80 < I _v < 100		60 < I _v < 80		40 < I _v < 60		20 < I _v < 40		0 < I _v < 20		
فاکتور کاهش F _R										
F _R =2		F _R =1.75		F _R =1.50		F _R =1.25		F _R =1		
پارامتر کنترل										
β _{max}	S _{max} (mm)	β _{max}	S _{max} (mm)	β _{max}	S _{max} (mm)	β _{max}	S _{max} (mm)	β _{max}	S _{max} (mm)	
<1/1000	<5	<1/875	<5.7	<1/750	<6.7	<1/625	<8	<1/500	<10	۱
1/1000- 1/400	5-25	1/875- 1/350	5.7- 28.5	1/750- 1/300	6.7- 33	1/625- 1/250	8-40	1/500- 1/200	10- 50	۲
1/400- 1/100	25- 37.5	1/350- 1/88	28.5- 43	1/300- 1/75	33- 50	1/250- 1/63	40- 60	1/200- 1/50	50- 75	۳
>1/100	>37.5	>1/88	>43	>1/75	>50	>1/63	>60	>1/50	>75	۴

(S_{max}: ماکزیمم نشست سطح، β_{max}: چرخش زاویه‌ای)

جدول (۳-۳): طبقه‌بندی آسیب بورلند برای مترو پورتو با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری [۳]

اندیس آسیب‌پذیری ساختمان‌ها										کلاس آسیب	
شدید		متوسط		کم		پایین		قابل چشم‌پوشی			
$80 < I_v < 100$		$60 < I_v < 80$		$40 < I_v < 60$		$20 < I_v < 40$		$0 < I_v < 20$			
فاکتور کاهش F_R											
$F_R=2$		$F_R=1.75$		$F_R=1.50$		$F_R=1.25$		$F_R=1$			
پارامتر کنترل											
\mathcal{E}		\mathcal{E}		\mathcal{E}		\mathcal{E}		\mathcal{E}			
max	min	max	min	max	min	max	min	max	min		
0.025	0	0.029	0	0.033	0	0.040	0	0.050	0		۰
0.038	0.025	0.043	0.029	0.050	0.033	0.060	0.040	0.075	0.050		۱
0.075	0.038	0.860	0.043	0.100	0.050	0.120	0.060	0.150	0.075	۲	
0.150	0.075	0.171	0.860	0.200	0.100	0.240	0.120	0.300	0.150	۳	
	>0.150		>0.171		>0.200		>0.240		>0.300	۴ و ۵	

(\mathcal{E} : کرنش افقی)

۳-۳-۳ حداکثر نشست مجاز سازه‌ها

در این بخش مقدار نشست مجاز سازه‌های سطحی از دیدگاه محققین و آئین نامه‌های مختلف بررسی می‌شود تا امکان مقایسه میزان خسارت وارده به سازه‌های سطحی فراهم آید جدول (۳-۴). مرور ادبیات فنی موضوع در این زمینه نشان می‌دهد که معمولاً مقدار نشست مجاز عمدتاً به سیستم سازه و شرایط بهره‌برداری از سازه بستگی دارد [۷].

جدول (۳-۴): ماکزیمم نشست مجاز برای برخی سازه‌ها [۲]

نشست (میلیمتر)	نوع سازه
۷۵	ساختمان‌های آجری
۱۰۰	
۱۰۰	سازه‌های اسکلتی
۱۵۰	ساختمان‌های آجری مسلح و بتن‌های مسلح
۳۰۰	سازه‌هایی با پی‌های بتنی مسلح مانند برج‌ها، پل‌ها و...

موقعیت سازه‌ها نسبت به گودی نشست، به میزان قابل توجهی روی حرکت ساختمان تاثیر قابل توجهی خواهد گذاشت. به طوری که اگر ساختمان در قسمت محدب گودی نشست باشد دچار کشش و بالا آمدگی می‌شود و اگر در قسمت مقعر گودی نشست باشد دچار فشارش می‌شود [۷].

در مراجع مهندسی، توصیه‌های زیر برای نشست کلی و نسبی ارائه شده است (δ : نشست نسبی):

ساختمان‌های اداری - مسکونی با اسکلت فلزی:

- نشست کلی کمتر از ۵۰ میلیمتر باشد.

- ترزاقی پیشنهاد کردند که اختلاف نشست بین دو ستون متوالی کمتر از ۲۰ میلیمتر و یا نشست

نسبی $\delta < 1/250$ باشد.

- اسکمپتون و سور مقدار نشست نسبی را به میزان $1/500$ تا $1/250$ محدود می‌کنند.

- گاهی به منظور جلوگیری از ترک خوردگی رویه گچی ساختمان، مقدار δ به $1/1000$ تا

$1/500$ محدود می‌شود.

- کارخانجات: $\delta < 1/300$ [۱۷].

مقادیر نشست مجاز پیشنهادی آئین‌نامه (USSR) برای انواع سازه‌ها به شرح جدول (۳-۵) می‌باشد.

جدول (۳-۵): حداکثر نشست نسبی برای انواع ساختمان‌ها بر اساس آئین‌نامه (USSR) [۱۸]

سازه	بر روی رس خمیری (متر)	بر روی ماسه با رس سخت (متر)
قاب‌های فولادی و بتنی	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
دیوار آجری چند طبقه L/H تا ۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۳
دیوار آجری چند طبقه L/H بیش از ۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۵

۳-۳-۴ روش‌های کاهش نشست ساختمان‌ها

اجرای عملیات تونلسازی در محیط‌های شهری به ناچار بایستی از زیر ساختمان‌های متعددی عبور کند. در این حالت باید میزان گسترش حرکت زمین و همچنین شدت صدمه به ساختمان‌ها ارزیابی شود. سختی ساختمان‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تغییر روند جابجایی ناشی از حفاری تونل دارند. اگر گسترش نشست در این مواقع از حد ظرفیت ساختمان‌ها بیشتر باشد، باید تغییراتی در عملیات اجراء و یا انجام فرایندهای کنترل نشست مانند تزریق صورت گیرد. در زیر تعدادی از روش‌های کنترل نشست ساختمان‌ها آورده شده است [۳].

۱- افزایش ظرفیت ساختمان برای تحمل تنش‌های اضافی و نشست‌های ایجاد شده توسط تقویت سازه و بنابراین تغییر رفتار آن به تاثیر تونلسازی. این عمل شامل تقویت داخل ساختمان یا خارج ساختمان و یا زیربندهای فونداسیون ساختمان می‌باشد. شکل اصلی زیربند شامل بتن معمولی (بدون آرماتور)، زیربند با تزریق، شمع‌های با قطر بزرگ و ریز شمع‌ها، ایجاد تیرهای مسلح بتنی که پایه ستون‌های پی را به هم وصل می‌کند، می‌باشد.

۲- کاهش تدریجی احتمال نشست‌های ایجاد شده در اثر تونلسازی با حفاظ کشیدن به منظور جلوگیری از انتقال نشست‌ها به سمت فونداسیون ساختمان. این کار مستلزم نصب موانع فیزیکی میان فونداسیون ساختمان و تونل می‌باشد. موانع بصورت سازه‌ای به فونداسیون ساختمان وصل نمی‌شود و بنابراین انتقال بار مستقیم نمی‌باشد. هدف از این کار هموار کردن شکل نشست می‌باشد و در نتیجه کاهش تاثیر بر روی نواحی مجاور ساختمان‌های محافظت شده می‌باشد. موانع محافظتی نوعاً شامل زمین تحکیم شده و تقویت شده مانند پرده‌های دیواری تزریق، ستون‌های تزریق جت، ریزستون‌ها، یا ترکیب این سیستم‌ها می‌باشد. این موانع می‌تواند بصورت عمودی، اگر از سطح زمین اجرا شده باشد یا افقی اگر از چاه‌های دسترسی یا از عمیق‌ترین زیرزمین ساختمان‌های مجاور صورت بگیرد.

۳- کاهش تدریجی افت حجم که می‌تواند منجر به نشست شود. این کار با تحکیم زمین پیرامون تاج تونل یا کل بخش تونل قبل از حفاری با استفاده از تکنیک تحکیم حاصل می‌شود.

۴- تصحیح نشست‌ها. این کار با استفاده از تکنیک جکینگ یا بوسیله تزریق تحکیمی حاصل می‌شود. هدف تزریق تحکیمی ایجاد بالش سخت خاک تحکیم یافته در زون بین فونداسیون ساختمان‌ها و تاج تونل می‌باشد. بنابراین نه تنها نشست زمین پیرامون تونل بطور کامل به ساختمان‌ها منتقل نمی‌شود، همچنین برآمدگی فونداسیون‌ها را نیز می‌توان کنترل کرد.

کاربرد موفق تکنیک تزریق تحکیمی بستگی به نظارت دقیق وابسته به زمان زمین و جابجایی ساختمان‌ها و تنظیم دقیق و کنترل دقیق مقدار و محل تزریق دوغاب دارد. سیستم مونی‌تورینگ و تیوب‌های تزریق باید به خوبی هنگام پیشروی نصب شود. برای این کار سه مرحله تزریق لازم است:

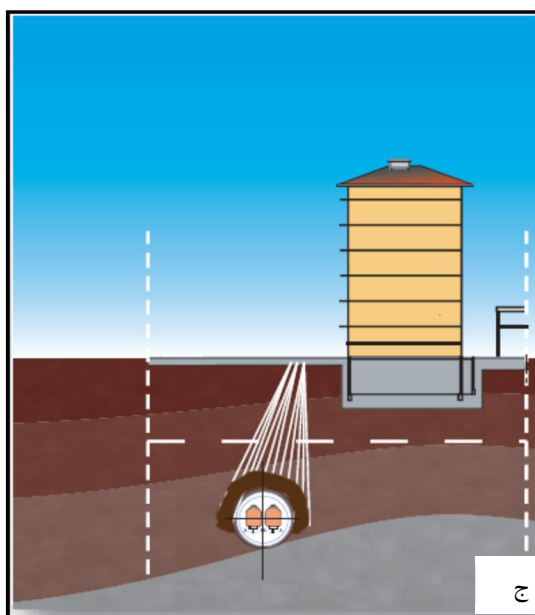
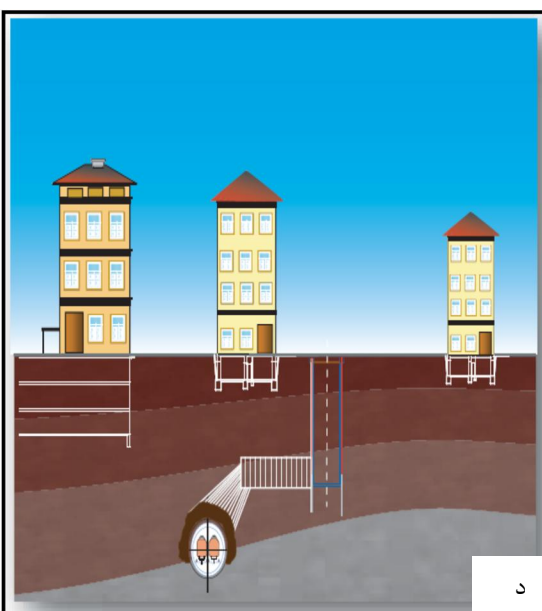
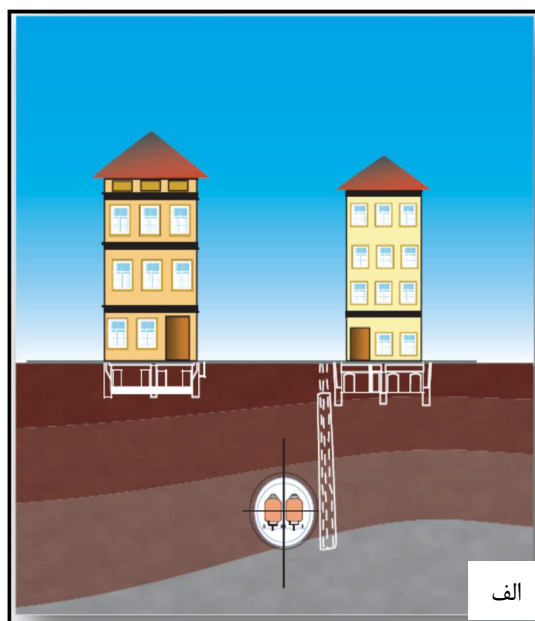
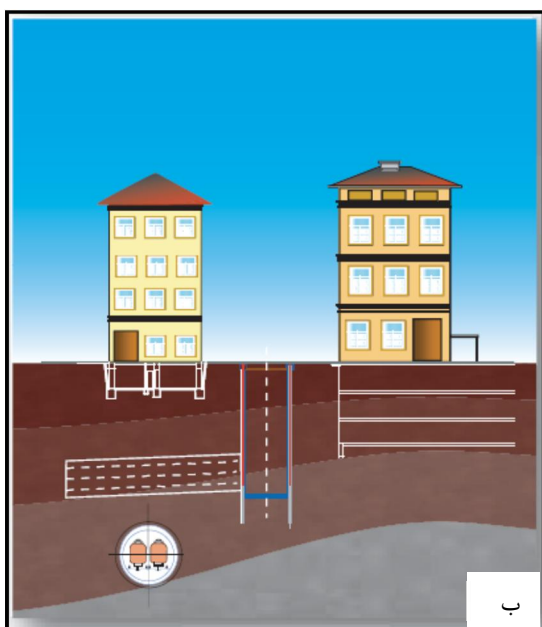
الف) قبل از عبور TBM برای سخت کردن زمین

ب) حین عبور TBM برای تصحیح کردن نشست‌های اضافی

ج) بعد از عبور TBM برای دوباره متراکم کردن زمین اگر نیاز باشد.

سخت کردن زمین، بالش، ممکن است نیازمند ترکیب تزریق تحکیمی (یا نفوذی) و تزریق سطح شکسته باشد. هدف تزریق تحکیمی بهبود مقاومت و خصوصیات نفوذپذیری زمین و آماده کردن آن برای مرحله بعدی تزریق دوغاب می‌باشد که با تزریق مایع دوغاب ترکیبی که قادر است بر اساس خصوصیات نفوذپذیری آن بدون سبب شدن جابجایی عمده توده خاک در منافذ خاک نفوذ کند، صورت می‌گیرد. تزریق سطح شکسته با تزریق زمین (برای فشرده شدن) حجم‌های کوچک دوغاب ویسکوز با فشار کافی برای ایجاد شبکه شکست‌ها در امتدادی که دوباره فشرده‌سازی زمین بدست آمده است صورت می‌گیرد. زمانی که بالش تزریق به میزان کافی فشرده شد، ساختمان‌ها شروع به واکنش در هر مرحله بعدی که بخوبی کنترل شده است می‌کند و سبب جابجایی‌های موضعی می‌شود. معمولاً قبل از اینکه TBM عبور

کند معمول است که زمین تا نقطه‌ای که ساختمان‌ها شروع به واکنش به تزریق مرحله‌ای بکنند سخت نشود اما سبب برآمدگی کنترل شده واکنشی به نشست مورد انتظار داشته باشد، تا اینکه (در طول حفاری تونل) نشست‌ها توسط این برآمدگی تصحیح شود و مقدار تزریق تحکیمی کاهش خواهد یافت.



شکل (۳-۲): الف) تزریق مایل برای ایجاد حائل بین ساختمان و تونل ب) اجرا تزریق از طریق چاه دسترسی برای تحکیم خاک پی زیر ساختمان ج) قوس محافظ تزریق شده از سطح زمین برای تحکیم محیط تونل د) قوس محافظ تزریق شده از طریق چاه دسترسی و تونل پایلوت [۳]

۳-۴ نتیجه‌گیری

به طور کلی اجرای عملیات تونلسازی در محیط‌های شهری به ناچار بایستی از زیر ساختمان‌های متعددی عبور کند. در این حالت باید میزان گستردگی حرکت زمین و همچنین شدت صدمه وارده به ساختمان‌ها ارزیابی شود. یک طراح سعی دارد که از صدمات وارد بر جزئیات معماری ساختمان جلوگیری به عمل آورد. روش‌های متنوع زیادی در ارتباط با پیش‌بینی صدمات ساختمان‌ها در اثر حرکت زمین ناشی از تونلسازی وجود دارد، که هر کدام دارای مزایا و نواقص هستند. بر اساس مطالعات محققین مختلف، در ارزیابی پتانسیل آسیب‌دیدگی ساختمان‌ها، پارامترهای چرخش زاویه‌ای و کرنش افقی اهمیت و تاثیر زیادی دارند. آنان ۳ معیار برای صدمات وارد بر ساختمان‌ها تعیین کردند، ظاهری و نمائی، کاربردی یا تعمیر پذیری، پایداری. در کشورهای مختلف استانداردهای گوناگونی برای نشست‌های مجاز سطح زمین در زیر ساختمان‌ها و در زیر خیابان‌ها، بر اساس نوع ساختمان‌ها، کاربری آن‌ها و نوع خاک زیر آن‌ها و ... ارائه شده است. و نیز اینکه روش اندیس آسیب‌پذیری، از مهم‌ترین روش‌هایی است که برای ارزیابی آسیب وارده بر ساختمان‌ها استفاده شده است.

همچنین یکی از موارد مهم در تونلسازی در مناطق شهری بازرسی ساختمان‌های سطحی می‌باشد. و در نهایت، طرحی از بازرسی منظم ساختمان‌ها حین تونلسازی باید تهیه شود. شرایط غیر طبیعی حین بازرسی دیداری باید شامل ثبت موارد زیر باشد: وجود ترک‌های جدید، بازشدگی ترک‌های موجود، الگوی ترک‌ها، جابجایی بلوک‌ها در سازه‌های معماری، جابجایی المان‌های روکشی (مانند کاشی‌ها)، ریزش گچ‌ها، شرایط پنجره‌ها، درها و لوله‌ها، پیچش درها و کف.

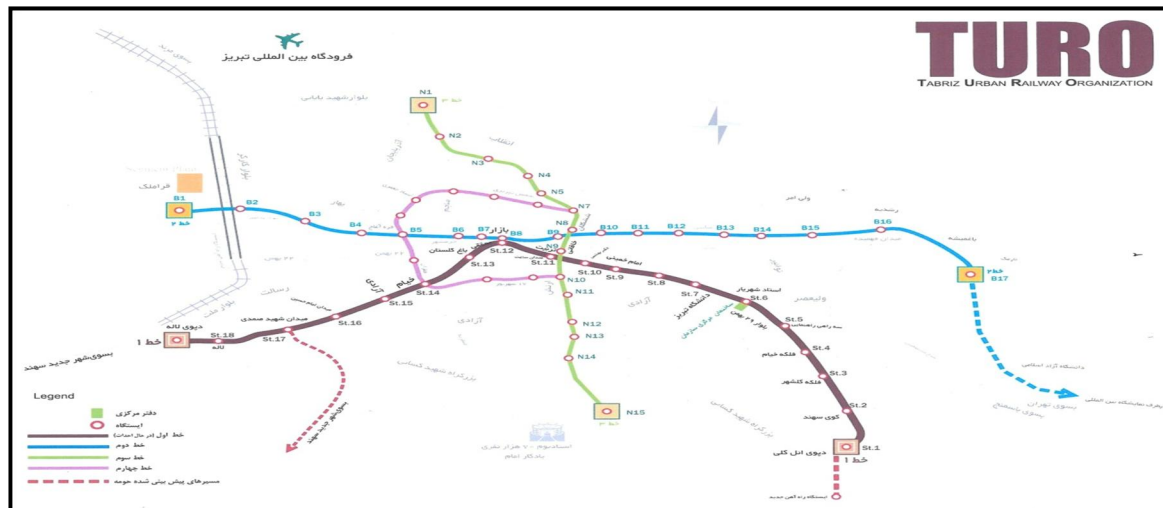
فصل چہارم

معرفی پروژہ خط یک مترو تبریز

۴ فصل چهارم: معرفی پروژه خط یک متروی تبریز

۴-۱ معرفی طرح قطار شهری تبریز

نرخ روزانه سفر با وسایل نقلیه موتوری، در داخل شهر تبریز ۱/۴ می‌باشد. ۱/۲۸ میلیون نفر در این شهر زندگی می‌کنند و روزانه ۱/۸ میلیون سفر درون شهری در تبریز انجام می‌گیرد. ۲۹ درصد از این سفرها با اتوبوس و مینی‌بوس، ۳۳ درصد با تاکسی و ۳۸ درصد با وسایل نقلیه شخصی صورت می‌گیرد. طبق پیش‌بینی‌ها جمعیت تبریز در سال ۱۴۰۰ هجری شمسی نزدیک ۲ میلیون نفر خواهد بود و میزان ۴/۵ میلیون سفر درون شهری در تبریز صورت خواهد گرفت. ۲۸ درصد از سفرهای داخل شهری در افق طرح قطار شهری یا مترو صورت خواهد گرفت. لذا با توجه به حجم وسیع مسافرت‌های درون‌شهری و ضرورت استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی در جهت کاهش مشکلات ترافیکی شهر، برای اولین بار در دی ماه ۱۳۶۹ موضوع مطالعه و احداث قطار شهری تبریز در مجلس مطرح گردید. در سال ۱۳۸۰ نیز مطالعات فاز اول و دوم آغاز گردید. شبکه قطار شهری تبریز شامل ۴ مسیر جمعاً حدود ۶۰ کیلومتر و ۶۰ ایستگاه طراحی گردید. خطوط متروی تبریز مطابق شکل (۴-۱) می‌باشد [۱۹].



شکل (۴-۱): طرح خطوط مترو تبریز [۱۹]

- مسیر اول به طول ۱۷/۲ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل گلی آغاز و از طریق بلوارهای ائل گلی و ۲۹ بهمن، خیابان امام خمینی، خیابان شهید سرگرد محقق، باغ گلستان، به کوی لاله ختم می شود.
- مسیر دوم به طول ۱۷ کیلومتر و ۱۷ ایستگاه از نزدیکی دانشگاه آزاد اسلامی در شرق تبریز آغاز و از طریق میدان فهمیده، خیابان عباسی، ششگیلان و بازار به قراملک ختم می شود.
- مسیر سوم به طول ۱۱ کیلومتر و شامل ۱۵ ایستگاه از میدان آذربایجان (حوالی فرودگاه تبریز) آغاز و از طریق بازار تا قراملک و خیابان طالقانی به ورزشگاه ۷۰ هزار نفری واقع در جنوب بزرگراه شهید کسایی ادامه می یابد.
- مسیر چهارم به طول ۱۰ کیلومتر به شکل حلقوی در مرکز شهر، سه مسیر فوق الذکر را به هم ارتباط می دهد.

۴-۱-۱ موقعیت و محل پروژه قطار شهری تبریز

- پروژه در شهر تبریز با مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۶ درجه ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۰۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. که در شکل (۲-۳) نقشه محل پروژه (با مقیاس ۱:۶۰۰۰۰۰) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲): نقشه محل پروژه [۲۰]

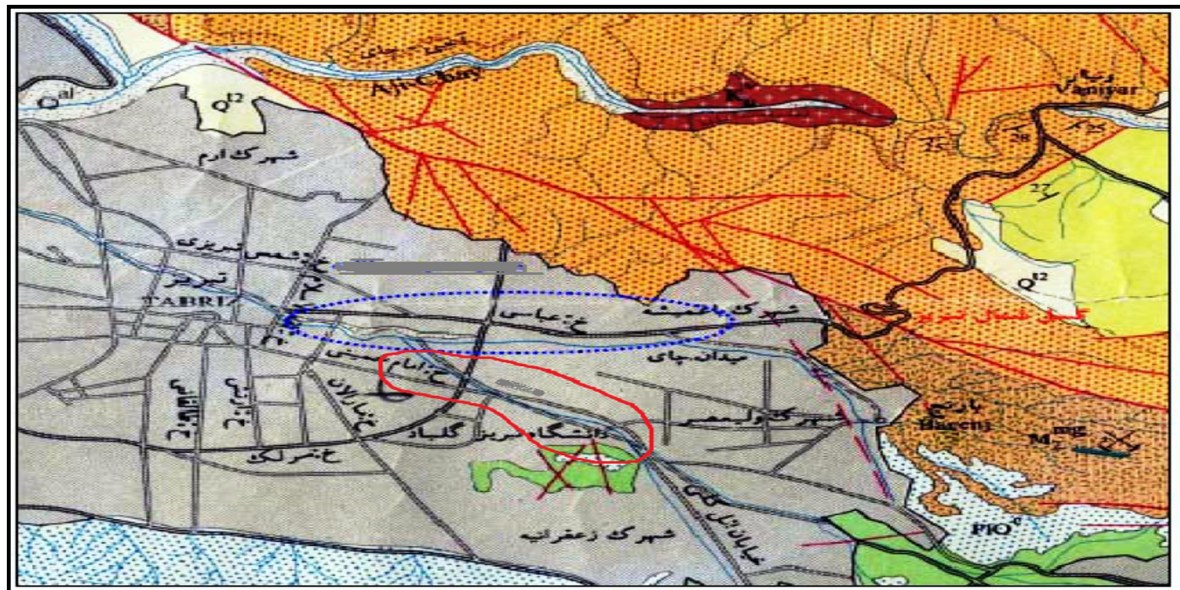
۴-۱-۲ زمین‌شناسی عمومی منطقه

زمین ساخت منطقه از نظر دیرینه‌شناسی بر اثر حرکات و فشارهای درونی و چین‌خوردگی‌های مربوط به دوران اول (پرمین) و دوران سوم (ائوسن) و به دلیل حرکات و شکست‌های پی در پی بوجود آمده در منطقه‌های آتشفشانی سهند و سبلان شکل گرفته است. همچنین حوزه آبی دریاچه ارومیه نیز در اثر شکل‌گیری این زمین‌ساخت پدیدار شده است. از نظر لیتولوژی اکثر تشکیلات و طبقات زمین‌شناسی آذربایجان، شامل طبقات رسوبی، تشکیلات آتشفشانی و تبخیری می‌باشند. مهمترین این طبقات که در اکثر نقاط آذربایجان رخنمون دارند عبارتند از: طبقات آهکی، مارنی، ماسه‌سنگ‌های قرمز، سنگ‌های آواری، سنگ‌های آذرین و رسوبات تبخیری شامل طبقات گچ و نمک و همچنین لایه‌های شیل و رگه‌های

نازکی از زغال می‌باشند. سن این سازندها به دوران اول و دوم زمین شناسی برمی‌گردد و بیشترین آنها متعلق به دوره کرتاسه می‌باشند. ضخامت رسوبات کرتاسه در بعضی نقاط آذربایجان به چند صد متر می‌رسد. بعلاوه سازندهای مربوط به دوران جدیدتر الیگوسن، میوسن، پلئوسن، نیز دیده می‌شوند. سازندهای اخیر مشتمل بر رسوبات دریایی کم ژرف مانند ماسه سنگ، مارن و سنگ‌های تبخیری و سنگ‌های آذرین هستند. بر روی این سازندها رسوبات هولوسن و آبرفت‌های جدید دوران کواترنری که بر اثر سیکل‌های فرسایشی بوجود آمده‌اند قرار دارند و نیز در پهنه وسیعی از منطقه آتشفشانی کالرد ملانزها گسترش دارند. در قسمت‌هایی از منطقه نیز تشکیلات ماسه‌سنگی و گدازه‌های آتشفشانی دوره‌های قبل از نئورژن در زیر طبقات آبرفتی جدید مشاهده می‌گردند (شکل (۳-۴) [۲۰].

۳-۱-۴ بررسی ساختاری مسیر

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، ژئیس و رسوبات آبرفتی از قبیل رس، لای، ماسه، شن و قلوه سنگ می‌باشد. به علاوه واریزه‌های کوه پایه‌ای و همچنین لایه‌هایی از خاکریزهای دستی در قسمت‌هایی از شهر دیده می‌شوند. در جدول (۴-۱) سازندهای تشکیل دهنده محدوده شهر تبریز معرفی شده‌اند.



کنگلومرای نیمه سخت به همراه میان لایه‌هایی از ماسه سنگ، سیلت‌سنگ و رس سنگ : Plq^2

تناوبی از مارنهای زرد سبز و خاکستری رنگ گچ‌دار : $M2^{mg}$

شکل (۳-۴) : وضعیت زمین‌شناسی تبریز و ساختار قطار شهری تبریز [۲۱]

جدول (۱-۴) : سازندهای تشکیل دهنده محدوده شهر تبریز [۲۱]

دوران	
کواترنری	آبرفت‌های کواترنری رسوبات تخریبی درشت دانه (ماسه شن دار و سیلت دار)
پلیوسن	رسوبات با فسیل ماهی طبقات حاوی فسیل ماهی (مارن، خاکستر آتشفشانی و دیاتومیت و با ضخامت متوسط ۷ متر)
میوسن	سازند باغمیشه (لایه‌های مارنی-شیلی خاکستری تا سبز تیره دارای ریز لایه‌های لیگنیت دار)
	سازند قرمز فوقانی رسوبات قرمز رنگ تخریب قاره ای (ماسه سنگ، سیلتستون، مارن و کنگلومرا همراه با طبقات گچی و نمکی)

شهر تبریز در زون البرز قرار گرفته است و از رژیم تکتونیکی حاکم بر آن پیروی می‌کند. تشکیل دشت تبریز و رسوب‌گذاری در آن و ایجاد ساخت‌های تکتونیکی که اغلب بصورت شکستگی‌ها و گسلش‌ها ظاهر پیدا کرده است، پیرو همین سیستم می‌باشد. دشت تبریز از شمال بوسیله کوه‌های عون‌ابن‌علی و از جنوب بوسیله ارتفاعات آتشفشانی سهند و رسوبات پیروکلاستیک مربوط به سهند احاطه شده است. عملکرد معکوس گسل شمال تبریز به سمت شمال باعث افتادگی قسمت جنوبی آن شده است. در اثر این عملکرد، در موازات بخش شمالی شکستگی‌هایی با جابجایی نرمال در جنوب دشت ایجاد شده است که حاصل آن‌ها افتادگی امتداد شرقی-غربی است.

۲-۴ مطالعات ژئوتکنیک

بررسی‌ها و مطالعات ژئوتکنیک به منظور ارائه داده‌های مربوط به رفتار خاک، که در ساخت بناها لازم می‌آید، صورت می‌گیرد و بطور کلی می‌توان گفت این بررسی‌ها برای رسیدن به نیازهای ساخت و عملکرد سازه انجام می‌گیرد. مطالعات صورت گرفته جهت بررسی‌های صحرایی و مطالعات و آزمایشات آزمایشگاهی مشتمل بر آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی به منظور شناخت شرایط و ویژگی‌های لایه‌های زیرزمینی و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله جهت دستیابی به اهداف زیر صورت گرفته است:

- تعیین بافت و ضخامت لایه‌های خاکی

- بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاکی

- تعیین نوع سیمان مصرفی

به منظور دستیابی به اهداف فوق انجام عملیات صحرایی ضروری می‌باشد. به همین منظور مطالعاتی

به شرح زیر انجام گردیده است:

۴-۲-۱ عملیات گمانه‌زنی

در راستای مطالعات ژئوتکنیک مسیر خط یک قطار شهری تبریز، تعداد پنج حلقه گمانه ماشینی بوسیله دستگاه حفاری دورانی در حد فاصل ایستگاه ۱۱ تا ایستگاه ۱۲ به عمق حداکثر ۴۰ متر در نقاط معرفی شده با مشخصات MBH8، MBH9، MBH10، FBH14 و FBH15 حفر گردید، که در شکل (۴-۴) موقعیت و محل این گمانه‌ها نسبت به راستای تونل نشان داده شده است [۲۲].



شکل (۴-۴) : موقعیت گمانه‌ها [۲۲]

۴-۲-۲ آزمایش‌های صحرائی

آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد (S.P.T) (طبق استاندارد A.S.T.M:D1507):

این آزمایش مقاومت خاک گمانه را ارزیابی نموده و نمونه دست خورده برای شناسایی خاک فراهم می‌سازد. مقاومت نفوذ را می‌توان به خصوصیات خاک و تغییرات آن از جمله: تخمین تراکم نسبی ماسه و شن، تخمین پارامترهای مقاومتی خاک، تخمین ظرفیت باربری مجاز پی‌های سطحی و عمیق در ماسه، تخمین مقدار نشست پی در ماسه و ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک‌های غیر چسبنده اشباع در شرایط زهکشی نشده ارتباط داد.

اساس آزمایش بر سقوط یک چکش به وزن $63/5$ کیلوگرم از ارتفاع 76 سانتیمتر و تعداد ضرباتی که باعث نفوذ 30 سانتی‌متر از طول لوله‌ای به قطر خارجی 50 میلی‌متر و قطر داخلی 35 میلی‌متر می‌گردد، قرار دارد. همچنین در محل گمانه‌ها تعدادی آزمایش نفوذپذیری صحرائی در اعماق مختلف با دو روش بار افنان و ثابت انجام گردید [۲۰].

۳-۲-۴ آزمایش‌های آزمایشگاهی

بر روی نمونه‌های دست خورده جهت تعیین خصوصیات فیزیکی خاک آزمایش‌های زیر انجام گردید:

- آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری (طبق استاندارد AASHTO T 27)

- آزمایش تعیین حدروانی و خمیری خاک (طبق استاندارد AASHTO T 89, T 90)

- آزمایش تعیین وزن مخصوص ذرات جامد

- آزمایش‌های شیمیایی جهت تعیین سولفات و کلرور خاک

همچنین آزمایش برش مستقیم به روش کند و اشباع با سرعت 0.1 mm/min (طبق

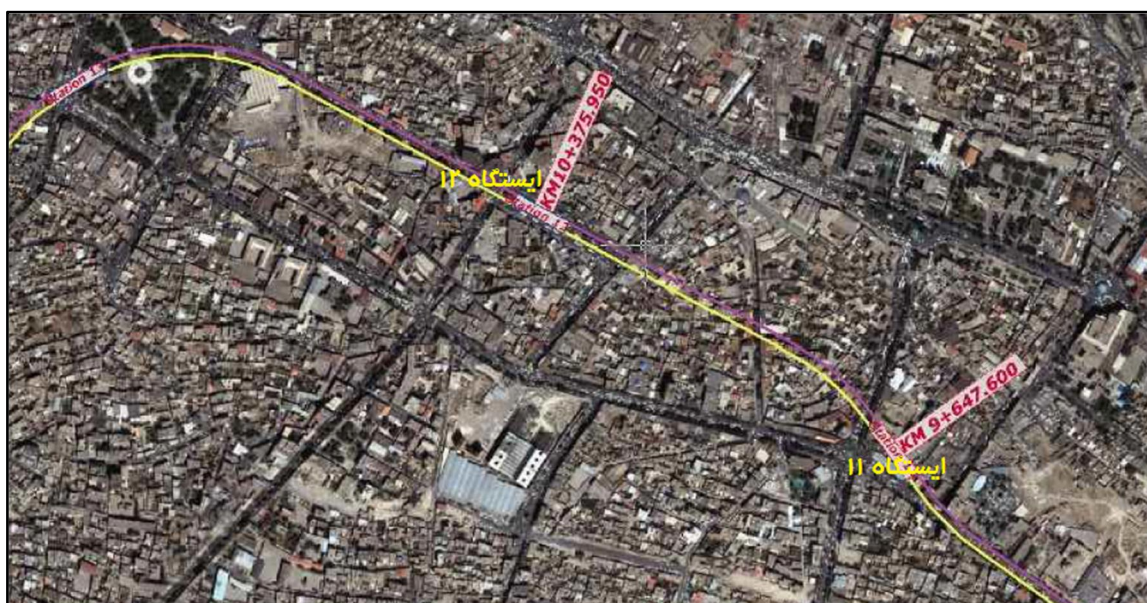
استاندارد ASTM D 3080) [۲۰].

۳-۴ روش حفاری

خط یک قطار شهری تبریز از لحاظ فیزیکی بصورت هم‌سطح، نیمه‌عمیق، عمیق و در ارتفاع طراحی شده است. در بخش عمیق به صورت دو تونل تک خطی (دوقلو) سهند و سبلان می‌باشد که عملیات حفاری تونل‌ها با استفاده از دو دستگاه TBM-EPB انجام می‌پذیرد. قطر حفاری تونل‌ها $6/88$ متر و قطر خارجی سگمنت‌ها $6/6$ متر و قطر داخلی تونل‌ها 6 متر است که دارای 14 سانتیمتر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌ها است که بوسیله بتن تزریقی پر می‌شود.

به منظور حفاری تونل‌ها به شرح فوق، لازم است که در شفت‌ها، جرثقیل‌های سقفی یا دروازه‌ای با ظرفیت مناسب که براحتی بتواند واگن‌های حمل‌خاک، لوکوموتیوها و سگمنت‌های تونل را جابجا کرده و

با احاطه به دو خط حفاری تونل سرویس کامل و مناسب را به آن‌ها برساند، نصب گردد. این جرثقیل‌ها خاک‌های حفاری شده داخل تونل را با واگن‌های مربوطه (muck car) بر روی شاسی تخلیه خاک (Tipping Device) قرار داده تا تخلیه صورت پذیرد و سگمنت‌های تونل را بر روی سگمنت‌های کار منتقل نماید. پس از تخلیه خاک‌های حاصل از حفاری از واگن‌های مربوطه، خاک‌ها بارگیری و به منظور خشک شدن به محل دپوی اولیه انتقال داده می‌شوند. با توجه به مقطع حفاری تونل حجم هر رینگ برابر ۵۲ متر مکعب تئوریک خواهد بود. با توجه به حداکثر طول حفاری در هر جبهه حفاری، حداقل دو ست کامل برای هر جبهه حفاری مورد نیاز می‌باشد. هر ست در هر بار یک رینگ کامل بتنی را به داخل تونل و به پشت دستگاه حمل خواهد نمود. به دلیل وجود آب و نفوذ پذیری زمین و ریزش‌های احتمالی، در هر رینگ حفاری با توجه به ابعاد مقطع حفاری لازم است که دوغاب تزریق شود. شکل (۴-۵) عکس هوایی مسیر مترو تبریز و مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۲۳].



شکل (۴-۵): مسیر ایستگاه ۱۱-۱۲ خط یک مترو تبریز [۲۳]

۴-۴ نتیجه گیری

در این فصل ابتدا مختصری در مورد خط یک مترو تبریز، شرایط جغرافیایی، زمین شناسی عمومی و زمین ساخت و تکتونیک منطقه بیان شد. سپس مطالعات ژئوتکنیکی محدوده مورد نظر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مختصری در مورد آزمایش‌های صحرایی و آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام گرفته بیان شد. با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، محدوده مورد نظر در محیط آبرفتی ماسه‌ای، ماسه لای دار همراه با شن با نشانه خمیری پایین و نفوذ پذیری متوسط 10^{-4} سانتی متر در ثانیه قرار دارد.

فصل پنجم

تعیین کلاس ریسک آسیب پذیری

ساختمان های خط یک متروی تبریز

۵ فصل پنجم: تعیین کلاس ریسک آسیب‌پذیری ساختمان‌های خط یک متروی

تبریز

۱-۵ مشخصات ساختمان‌های محدوده مورد مطالعه

در این بخش ابتدا اطلاعات مربوط به تمام ساختمان‌هایی که در طول مسیر پروژه شماره‌گذاری شده‌اند مطابق جدول (۱-۵) جمع‌آوری شد. همچنین اطلاعات مربوط به دیگر ساختمان‌ها در پیوست آورده شده است.

جدول (۱-۵): مشخصات ساختمان‌های واقع در محدوده مورد بررسی [۲۴]

شماره ساختمان	نوع ملک	عمر سازه (سال)	تعداد طبقات	ابعاد (متر)	نوع اسکلت	روباره (متر)	توضیحات
۳	خدماتی اداری	۲۰	۲	۲۰×۲۰	بتنی	۱۴/۵	-
۴	مسکونی	۱۰	۲	۲۰×۲۰	بتنی	۱۴/۵	-
۵	مسکونی	۲۵	۲	۱۵×۱۱	فلزی	۱۴/۶	-
۶	مسکونی	۲۵	۲	۸×۱۰	فلزی	۱۴/۶	-
۲۱	تجاری-اداری	۳۰	۲	۳۰×۱۲	فلزی	۱۶/۶	پاساژ زمرد
۲۲	تجاری-تولیدی	۳۵	۵	۲۵×۲۰	فلزی	۱۶/۳	پاساژ آزادی
۲۳	تجاری	۵۰	۲	۱۲×۱۰	چوبی	۱۶/۶	ریزشی
۳۲	عمومی	۱۵۰	۲	۱۰×۱۲	حمال	۱۵/۸	خانه حریری- میراث فرهنگی
۳۳	عمومی	۱۵۰	۲	۱۰×۲۰	حمال	۱۵/۸	خانه حریری- میراث فرهنگی

ادامه جدول (۵-۱)

شماره ساختمان	نوع ملک	عمر سازه (سال)	تعداد طبقات	ابعاد (متر)	نوع اسکلت	روباره (متر)	توضیحات
۳۴	مسکونی	۵۰	۲	۱۰×۱۴	حمال	۱۶/۲	-
۴۰	مسکونی	۳۰	۱	۱۲×۱۲	حمال	۱۷/۹	-
۴۱	مسکونی	۵۰	۲	۶×۱۲	حمال چوبی	۱۸	-
۴۲	عمومی	۵۰	۱	۸×۱۲	حمال قوسی	۱۸	مسجد- میراث فرهنگی
۴۳	خدماتی	۱۰۰	۱	۱۲×۱۲	حمال چوبی	۱۸/۱	میراث فرهنگی

۵-۲ طبقه‌بندی ساختمان‌های محدوده مورد مطالعه

در این مرحله برای تک تک ساختمان‌های مسیر که به طور مستقیم و یا غیر مستقیم تحت تاثیر حفاری تونل قرار دارند میزان نشست با استفاده از دوربین نقشه‌برداری برداشت شده است. روش نقشه‌برداری در پروژه خط یک متروی تبریز به این صورت است که، ابتدا یک نقطه مبنا در فاصله‌ای که تونل‌ها تاثیری بر آن نداشته باشند، انتخاب شده و سپس مختصات این نقطه (X_1, Y_1, Z_1) را یادداشت می‌کنند. سپس جابجایی هر ایستگاه نقشه‌برداری (X_2, Y_2, Z_2) را نسبت به ایستگاه مبنا، برای زمان‌های مشخصی، به فاصله زمانی ۲ هفته قبل از رسیدن دستگاه و بعد از عبور دستگاه حفاری از زیر یا کنار ساختمان بدست می‌آورند. اختلاف مقادیر (X, Y, Z) این دو ایستگاه، میزان جابجایی‌ها را نشان می‌دهد. شبکه نقاط برداشت متشکل از ۴۰ ایستگاه در روی محور تونل و طرفین محور تونل بود. در نهایت نشست نهائی با استفاده از دوربین نقشه‌برداری بدست آمد و سپس با توجه به خصوصیات ساختمان‌ها، اندیس آسیب‌پذیری برای هر ساختمان تعیین گردید و در ادامه با ترکیب این دو مورد، کلاس ریسک آسیب‌پذیری برای هر ساختمان و سازه موجود در طول مسیر پروژه بر اساس طبقه بندی رانکین طبق

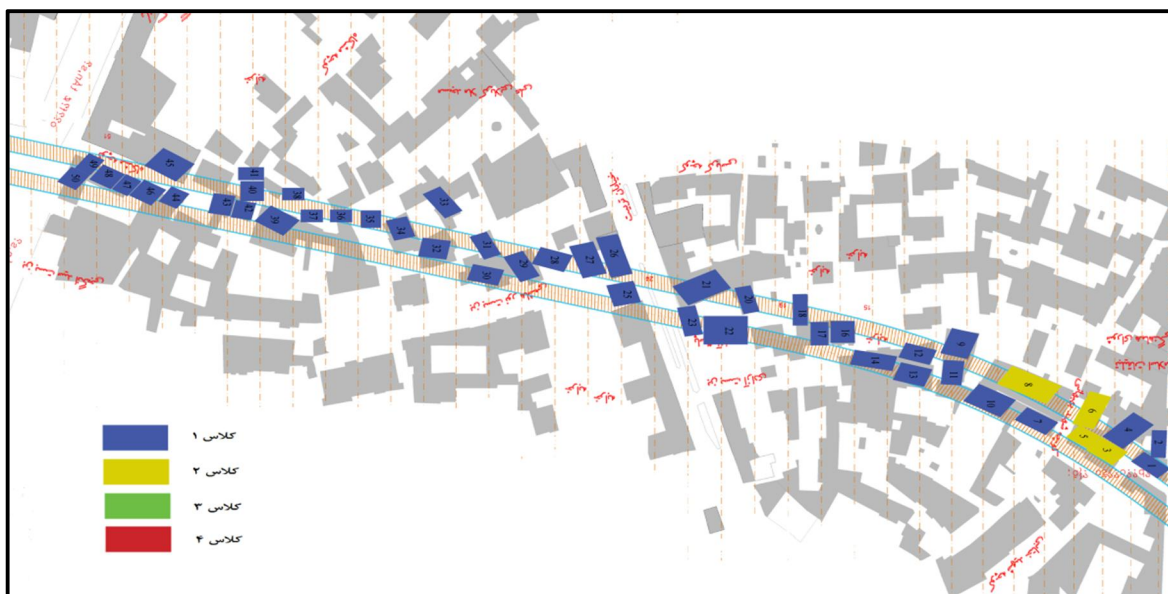
جدول (۲-۵) تعیین گردید. اندیس آسیب‌پذیری و کلاس ریسک آسیب‌پذیری ساختمان‌های مسیر خط یک مترو تبریز به ترتیب در شکل‌های (۱-۵) و (۲-۵) نشان داده شده است. کلاس ریسک آسیب‌پذیری دیگر ساختمان‌ها در پیوست آورده شده است. به طور کلی شکل (۳-۵) مراحل مختلف پروسه مربوط به آنالیز ریسک نشست ساختمان‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۵) : طبقه‌بندی ساختمان‌ها با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری رانکین

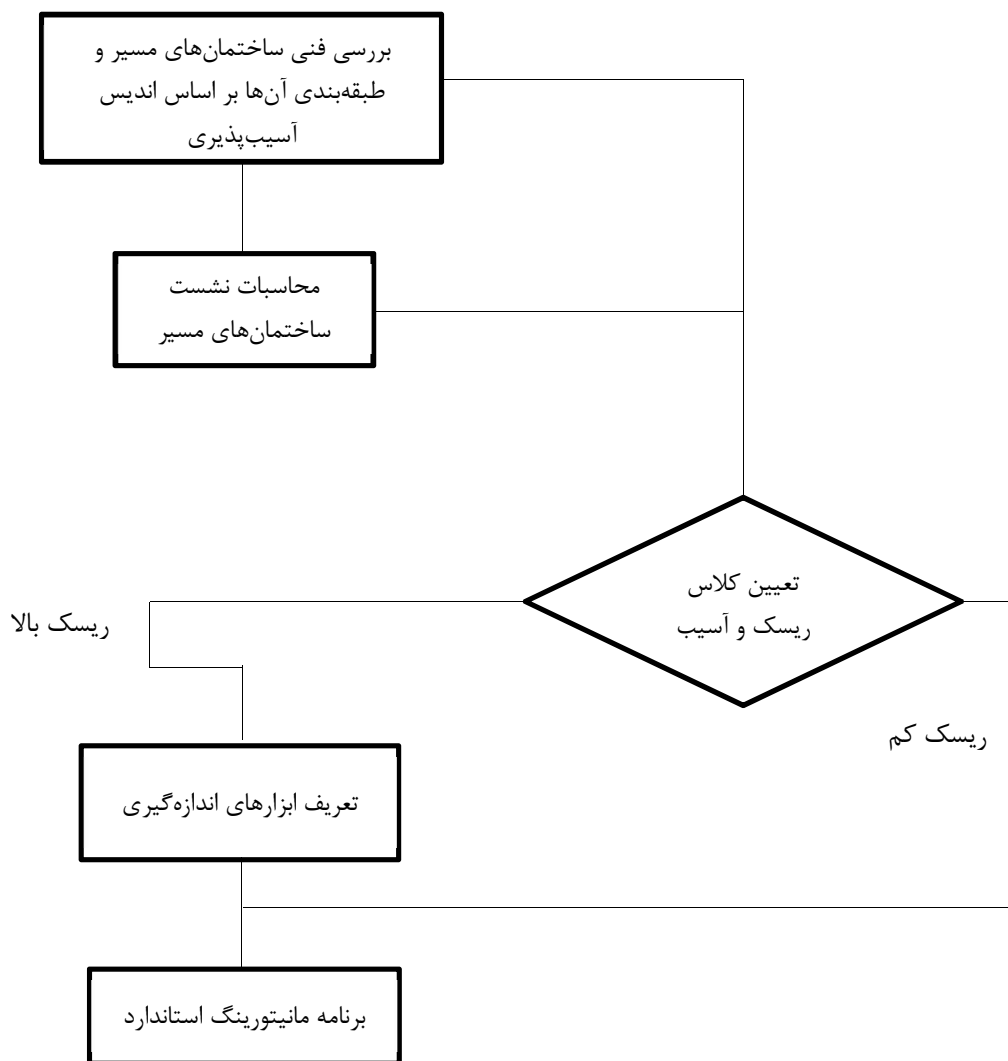
کلاس آسیب		نشست ماکزیمم (میلیمتر)	اندیس آسیب‌پذیری		شماره ساختمان
بلند مدت	کوتاه مدت		بلند مدت	کوتاه مدت	
۲	۲	۱۹	۳۴/۵	۳۴/۵	۳
۱	۱	۳	۲۸/۵	۲۸/۵	۴
۲	۲	۱۲	۳۸	۳۸	۵
۲	۲	۸	۳۷	۴۲	۶
۱	۱	۲	۳۷	۴۲	۲۱
۱	۱	۲	۳۲	۳۲	۲۲
۱	۱	۲	۶۰	۶۰	۲۳
۱	۱	۳	۸۸/۵	۸۸/۵	۳۲
۱	۱	۳	۸۳	۸۳	۳۳
۱	۱	۲	۵۱	۵۱	۳۴
۱	۱	۱	۵۳	۵۳	۴۰
-	-	-	۵۲/۵	۵۲/۵	۴۱
۱	۱	۲	۷۰	۷۰	۴۲
۱	۱	۱	۸۷	۸۷	۴۳



شکل (۵-۱): اندیس آسیب‌پذیری ساختمان‌های مسیر خط یک مترو تبریز



شکل (۵-۲): کلاس ریسک آسیب‌پذیری ساختمان‌های مسیر خط یک مترو تبریز



شکل (۳-۵) : مراحل مختلف آنالیز ریسک نشست

در نهایت با بررسی‌های انجام شده و تعیین کلاس ریسک آسیب‌پذیری برای تمام ساختمان‌های ایستگاه ۱۱ تا ۱۲ خط یک متروی تبریز، ساختمان‌های بحرانی مشخص شد. که بر اساس این طبقه‌بندی، مقاطع و ساختمان‌های مورد نظر به منظور مدلسازی عددی در شکل (۴-۵) و جدول (۳-۵) آورده شده است.



شکل (۴-۵) : ساختمان‌ها و مقاطع مورد بررسی

با توجه به شکل (۴-۵)، ۴ مقطع بحرانی و ساختمان‌های واقع در محدوده هر یک از مقاطع، مطابق

جدول (۳-۵) تعیین شدند:

جدول (۳-۵) : ساختمان‌های مورد بررسی

ساختمان‌ها	شماره مقطع
۳،۴،۵،۶	۱
۲۰،۲۱،۲۲،۲۳	۲
۳۲،۳۳،۳۴	۳
۴۰،۴۱،۴۲،۴۳	۴

در مرحله بعد برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده خاکی جهت استفاده در مدلسازی عددی مقاطع فوق‌الذکر و ارزیابی ساختمان‌های واقع در محدوده هر یک از مقاطع از اطلاعات نزدیک‌ترین گمانه

استفاده شده است. اطلاعات مربوط به گمانه‌های مجاورت ساختمان‌های مسیر در جدول (۴-۵) نشان داده شده است.

جدول (۴-۵): موقعیت ساختمان‌ها نسبت به گمانه‌های حفاری شده [۲۳]

گمانه در دسترس	متراز	شماره ساختمان	مقطع
MBH9	۹۷۷۰	۳	۱
MBH9	۹۷۷۰	۴	۱
MBH9	۹۷۸۰	۵	۱
MBH9	۹۸۰۰	۶	۱
MBH10	۹۹۵۰	۲۱	۲
MBH10	۹۹۴۰	۲۲	۲
MBH10	۹۹۶۰	۲۳	۲
MBH10	۱۰۰۷۰	۳۲	۳
MBH10	۱۰۰۸۰	۳۳	۳
MBH10	۱۰۰۹۰	۳۴	۳
MBH15	۱۰۱۵۰	۴۰	۴
MBH15	۱۰۱۵۰	۴۱	۴
MBH15	۱۰۱۵۰	۴۲	۴
MBH15	۱۰۱۸۰	۴۳	۴

خصوصیات ژئومکانیکی گمانه‌های محدوده مورد مطالعه در جدول (۵-۵)، (۶-۵) و (۷-۵) درج شده

است.

جدول (۵-۵): خصوصیات ژئومکانیکی گمانه MBH9 [۲۲]

R_{inter}	V_{ur}	E_{50} (kN/m^2)	C (kN/m^2)	ϕ' ($^\circ$)	γ_{dry} (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	نوع خاک	عمق (متر)
Rigid	۰/۲	۱۰۰۰۰	۲۵	۳۳	۱۵	۱۸	clay	۰-۴
۰/۷	۰/۲	۲۰۰۰۰	۰	۳۸	۱۶	۲۰	sand	۴-۳۰
Rigid	۰/۲	۱۵۰۰۰	۱۰	۳۲	۱۷	۱۹	silty sand	۳۰-۳۴
Rigid	۰/۲	۱۰۰۰۰	۲۵	۲۸	۱۶	۲۰	caly	۳۴-۴۰

جدول (۶-۵): خصوصیات ژئومکانیکی گمانه MBH10 [۲۲]

R_{inter}	V_{ur}	E_{50} (kN/m^2)	C (kN/m^2)	ϕ' ($^\circ$)	γ_{dry} (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	نوع خاک	عمق (متر)
Rigid	۰/۲	۱۰۰۰۰	۲۵	۲۱	۱۶	۲۰	clay	۰-۱۵
۰/۷	۰/۲	۲۰۰۰۰	۰	۳۲	۱۸	۲۱	sand	۱۵-۳۱
Rigid	۰/۲	۱۰۰۰۰	۲۰	۲۰	۱۳	۱۸	clay	۳۱-۴۰

جدول (۷-۵): خصوصیات ژئومکانیکی گمانه FBH15 [۲۲]

R_{inter}	V_{ur}	E_{50} (kN/m^2)	C (kN/m^2)	ϕ' ($^\circ$)	γ_{dry} (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	نوع خاک	عمق (متر)
Rigid	۰/۲	۱۰۰۰۰	۲۵	۲۳	۱۵	۲۰	clay	۰-۲/۷
Rigid	۰/۲	۲۰۰۰۰	۵	۳۰	۱۸	۲۱	silty sand	۲/۷-۷/۷
Rigid	۰/۲	۱۵۰۰۰	۰	۳۵	۱۶	۱۹	sand	۷/۷-۱۸/۶۰
۰/۷	۰/۲	۲۰۰۰۰	۵	۳۲	۲۰	۲۱	silty sand	۱۸/۶۰-۳۱
Rigid	۰/۲	۱۲۰۰۰	۰	۲۱	۱۶	۱۹	sand	۳۱-۴۰

برای مقاطع مورد مطالعه، نزدیک‌ترین گمانه‌ها به مقاطع مورد نظر و همچنین سطح آب زیرزمینی در

محل این گمانه‌ها در جدول (۸-۵) آورده شده است.

جدول (۵-۸): موقعیت گمانه‌ها نسبت به مقاطع و سطح آب زیرزمینی در گمانه‌ها [۲۳]

شماره مقطع	گمانه	سطح آب زیرزمینی (متر)
۱	MBH9	۱۰/۳
۲	MBH10	۹/۴
۳	MBH10	۹/۴
۴	FBH15	۸/۴

۳-۵ نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا مشخصات ساختمان‌های محدوده مورد مطالعه، نحوه رفتارنگاری ساختمان‌ها و محل گمانه‌های حفاری شده و خصوصیات ژئومکانیکی گمانه‌ها در محدوده مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه طبقه‌بندی ساختمان‌های مورد مطالعه با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری رانکین و کلاس ریسک آسیب‌پذیری آن‌ها بر اساس میزان نشست ثبت شده با دوربین نقشه‌برداری بیان شد. و در نهایت ۴ مقطع بحرانی و ساختمان‌های واقع در این مقاطع به منظور مدلسازی عددی مشخص گردید.

فصل ششم

تخمین نشست سطح زمین با روش‌های

تحلیلی و تجربی

۶ فصل ششم: تخمین نشست سطح زمین با روش‌های تحلیلی و تجربی

۶-۱ مقدمه

در این فصل به منظور مقایسه نتایج بدست آمده از مدل عددی، نتایج بدست آمده با روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس و روش تجربی پک مقایسه می‌شود.

۶-۲ روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس

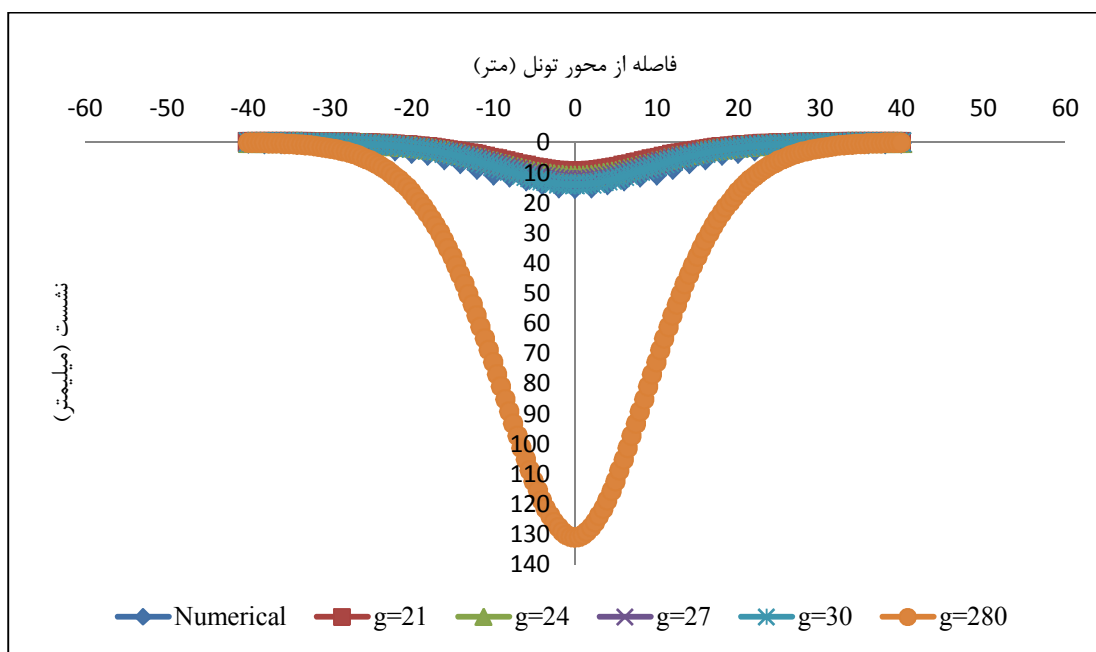
از آنجایی که قطر حفاری در خط یک مترو تبریز ۶/۸۸ متر و قطر خارجی آستر کاری (سگمنت گذاری) ۶/۶۰ متر می‌باشد، بنابراین اندازه G_p برابر ۲۸۰ میلیمتر خواهد بود. طبق اظهارات لی و همکارانش با کاربرد فنون مناسب ساخت (نظیر استفاده از سپر فشار تعادلی زمین)، حرکت سه بعدی جلوی سینه کار می‌تواند کنترل شود، به عبارت دیگر اگر هیچ آزادی فشار در سینه کار وجود نداشته باشد میزان این پارامتر صفر خواهد شد، پس $U_{3D} = 0$. در ضمن با فرض دستیابی به مهارت کافی عوامل اجرائی در حین حفاری تونل تا زمان رسیدن تونل به مقطع مورد نظر مشکل افت زمین به لحاظ این پارامتر دیگر وجود نخواهد داشت و در نتیجه ω قابل صرف نظر کردن خواهد بود، از این رو گپ معادل گپ فیزیکی در نظر گرفته می‌شود:

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

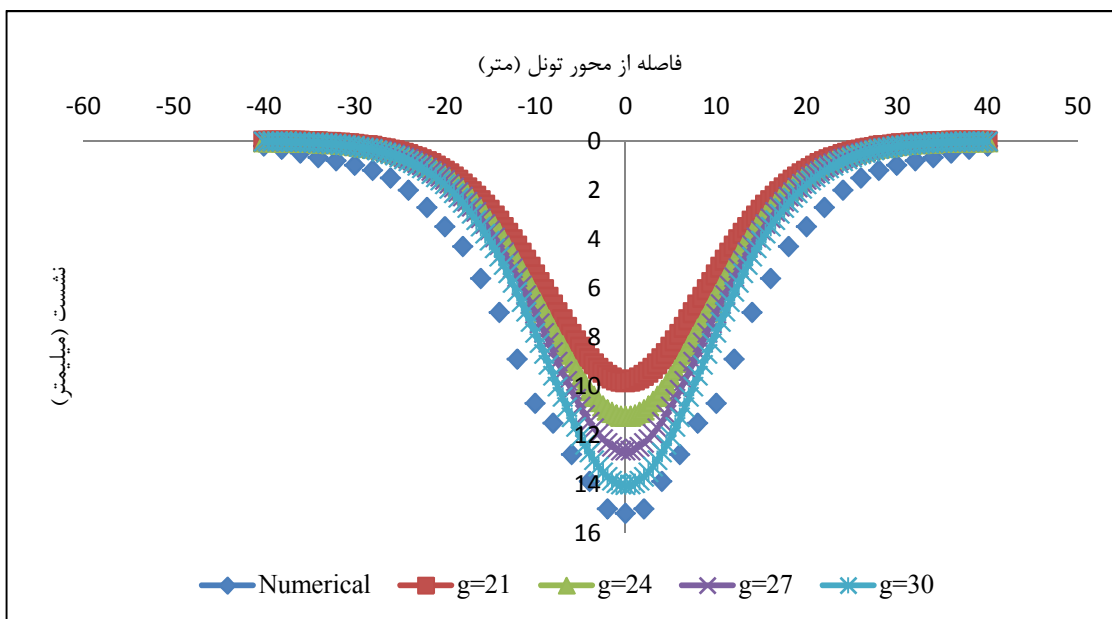
طبق تحقیقات اینگلس بر روی نمونه‌های تزریقی با انجام عملیات تزریق این فاصله به ۰/۰۷-۰/۱ میزان اولیه آن کاهش خواهد یافت، که این مقدار ضریب تصحیح نامیده می‌شود.

با توجه به شکل‌های (۲-۶)، (۴-۶)، (۶-۶) و (۸-۶) نشست بدست آمده با مدل عددی برای مقاطع ۱، ۲، ۳ و ۴ با نشست بدست آمده با روش لاگاناتان و پولوس به ازای اندازه گپ‌های مختلف مقایسه

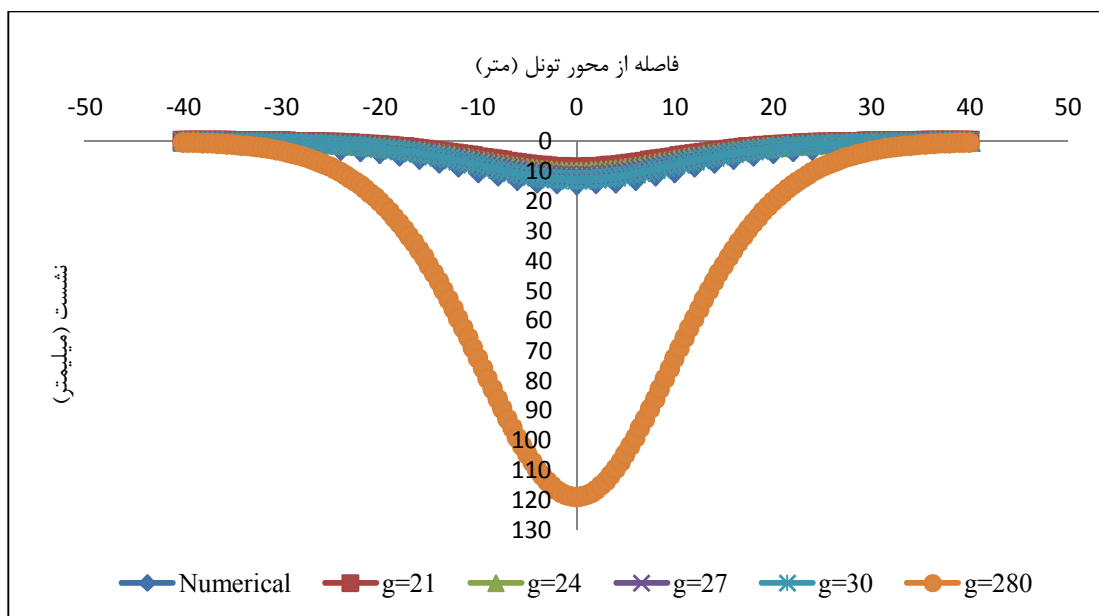
شده‌اند. همچنین در شکل‌های (۱-۶)، (۳-۶)، (۵-۶) و (۷-۶) نشست سطح زمین بدون عملیات تزریق ($g=280$) نیز نشان داده شده است. به ازای اندازه گپ ۳۰ میلیمتر نتایج بیشترین سازگاری را با یکدیگر دارند و به ازای اندازه گپ ۲۸۰ میلیمتر یعنی زمانی که تزریق صورت نمی‌گیرد بیشترین نشست اتفاق می‌افتد و همچنین در این حالت نتایج حاصل از مدل عددی و روش‌های تحلیلی و تجربی تفاوت زیادی با یکدیگر دارند.



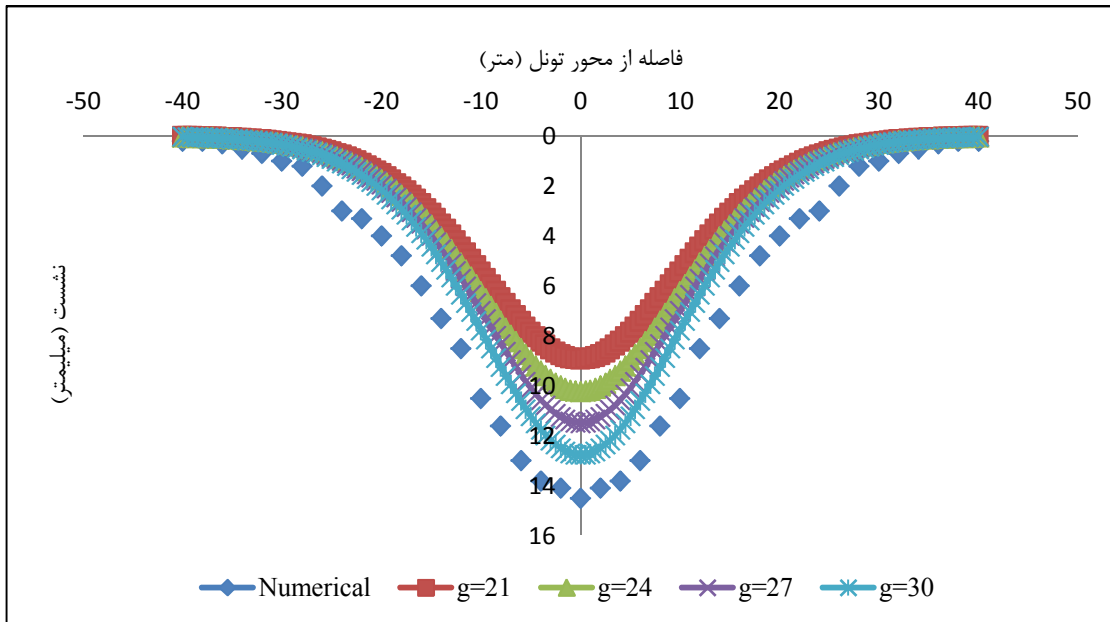
شکل (۱-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۱ (با در نظر گرفتن $g=280$)



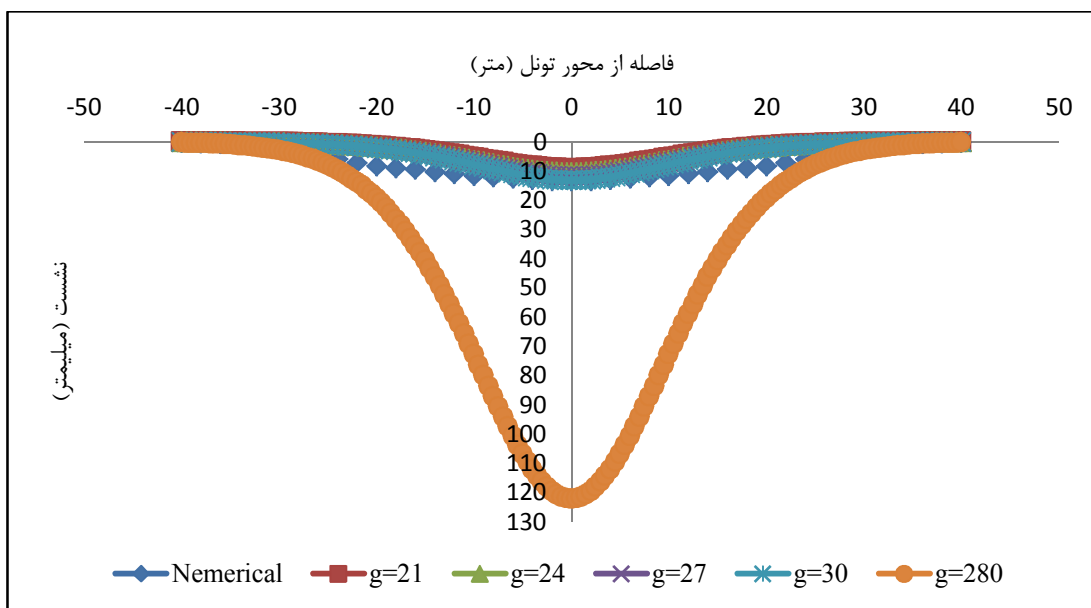
شکل (۶-۲): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۱



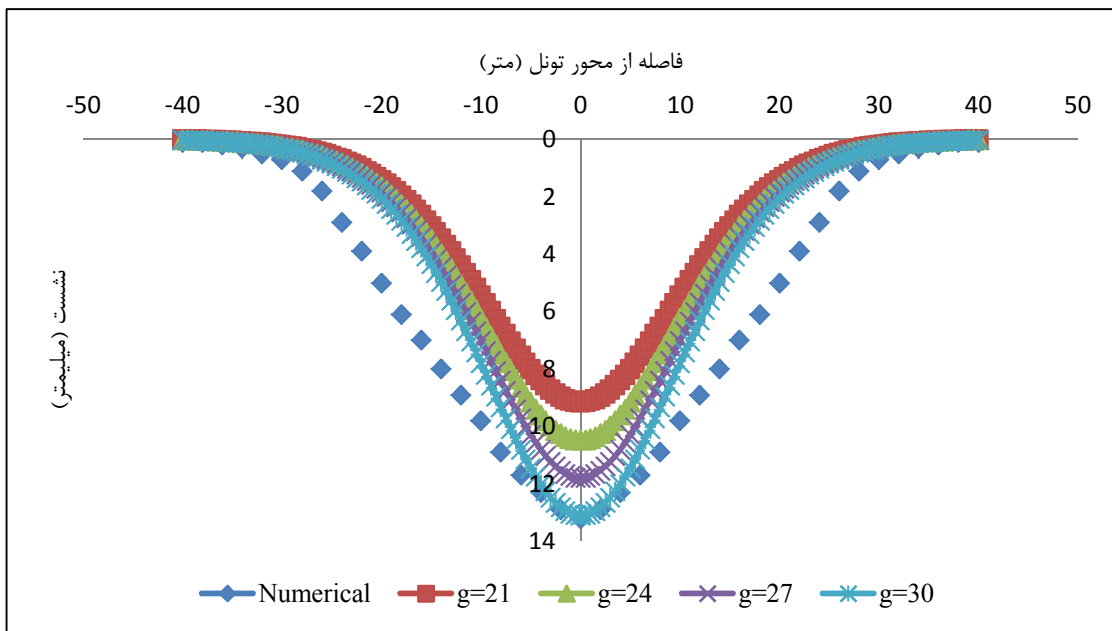
شکل (۶-۳): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۲ (با در نظر گرفتن $g=280$)



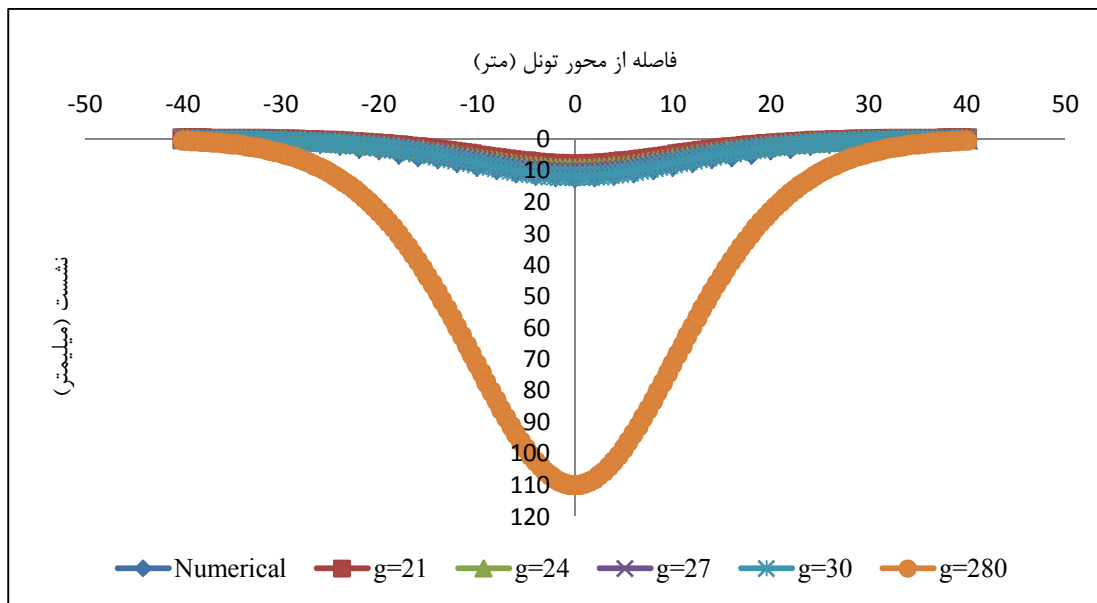
شکل (۴-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۲



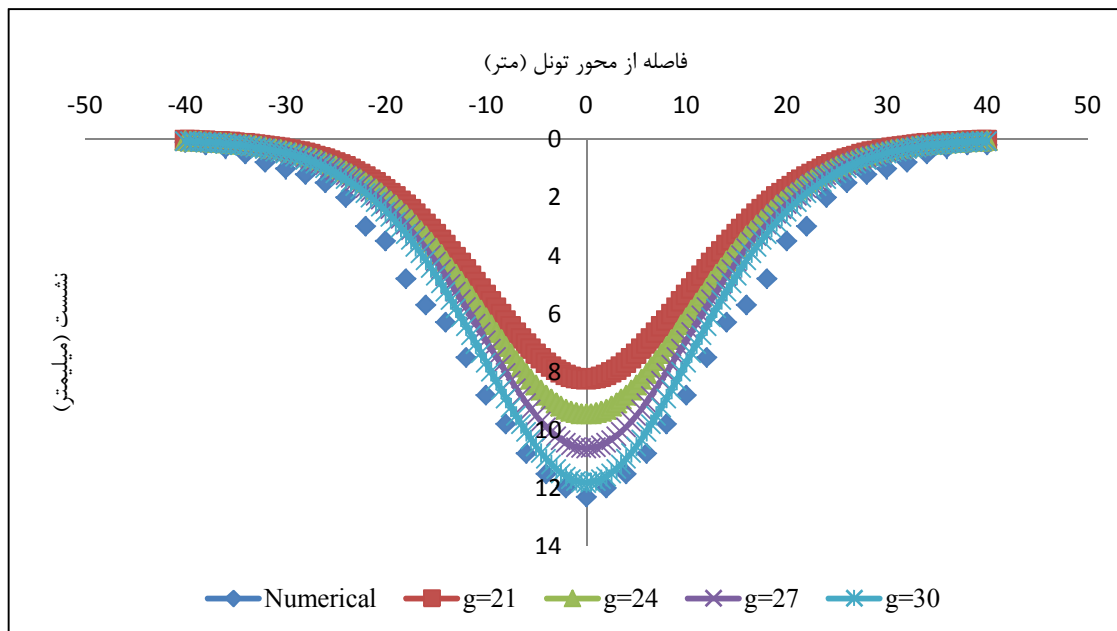
شکل (۵-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۳ (با در نظر گرفتن $g=280$)



شکل (۶-۶): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۳



شکل (۶-۷): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۴ (با در نظر گرفتن $g=280$)



شکل (۶-۸): نمودارهای نشست با روش لاگاناتان و پولوس مقطع ۴

با توجه به نمودارهای نشست بدست آمده از روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس برای ۴ مقطع بحرانی مورد بررسی، میزان نشست ماکزیمم برای این ۴ مقطع با توجه به عمق قرارگیری تونل (Z_0)، اندازه گپ و فاکتور تصحیح در جدول‌های (۶-۱)، (۶-۲)، (۶-۳) و (۶-۴) آورده شده است.

جدول (۶-۱): نتایج نشست با روش لاگاناتان و پولوس برای مقطع ۱

$S_{max}(mm)$	اندازه گپ (میلی‌متر)	فاکتور تصحیح	$Z_0(m)$	مقطع
۹/۸۳	۲۱	۰/۰۷	۱۷/۹۴	۱
۱۱/۲	۲۴	۰/۰۸	۱۷/۹۴	۱
۱۲/۶	۲۷	۰/۰۹	۱۷/۹۴	۱
۱۴/۰۰	۳۰	۰/۱	۱۷/۹۴	۱
۱۳۱	۲۸۰	۱	۱۷/۹۴	۱

جدول (۲-۶): نتایج نشست با روش لاگانانان و پولوس برای مقطع ۲

مقطع	$Z_0(m)$	فاکتور تصحیح	اندازه گپ (میلی متر)	$S_{max}(mm)$
۲	۱۹/۷۴	۰/۰۷	۲۱	۸/۹۴
۲	۱۹/۷۴	۰/۰۸	۲۴	۱۰/۲
۲	۱۹/۷۴	۰/۰۹	۲۷	۱۱/۵
۲	۱۹/۷۴	۰/۱	۳۰	۱۲/۸
۲	۱۹/۷۴	۱	۲۸۰	۱۱۹

جدول (۳-۶): نتایج نشست با روش لاگانانان و پولوس برای مقطع ۳

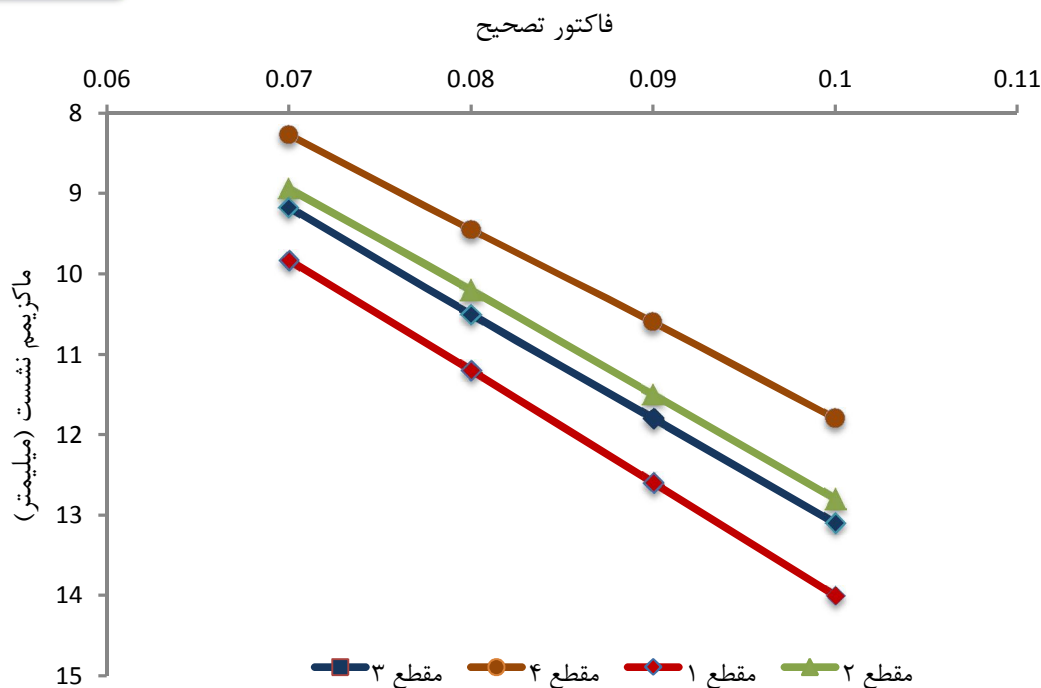
مقطع	$Z_0(m)$	فاکتور تصحیح	اندازه گپ (میلی متر)	$S_{max}(mm)$
۳	۱۹/۲۴	۰/۰۷	۲۱	۹/۱۷
۳	۱۹/۲۴	۰/۰۸	۲۴	۱۰/۵
۳	۱۹/۲۴	۰/۰۹	۲۷	۱۱/۸
۳	۱۹/۲۴	۰/۱	۳۰	۱۳/۱
۳	۱۹/۲۴	۱	۲۸۰	۱۲۲

جدول (۴-۶): نتایج نشست با روش لاگانانان و پولوس برای مقطع ۴

مقطع	$Z_0(m)$	فاکتور تصحیح	اندازه گپ (میلی متر)	$S_{max}(mm)$
۴	۲۱/۳۴	۰/۰۷	۲۱	۸/۲۷
۴	۲۱/۳۴	۰/۰۸	۲۴	۹/۴۵
۴	۲۱/۳۴	۰/۰۹	۲۷	۱۰/۶
۴	۲۱/۳۴	۰/۱	۳۰	۱۱/۸
۴	۲۱/۳۴	۱	۲۸۰	۱۱۰

با توجه به شکل (۶-۹) با افزایش فاکتور تصحیح و افزایش اندازه گپ، ماکزیمم نشست افزایش

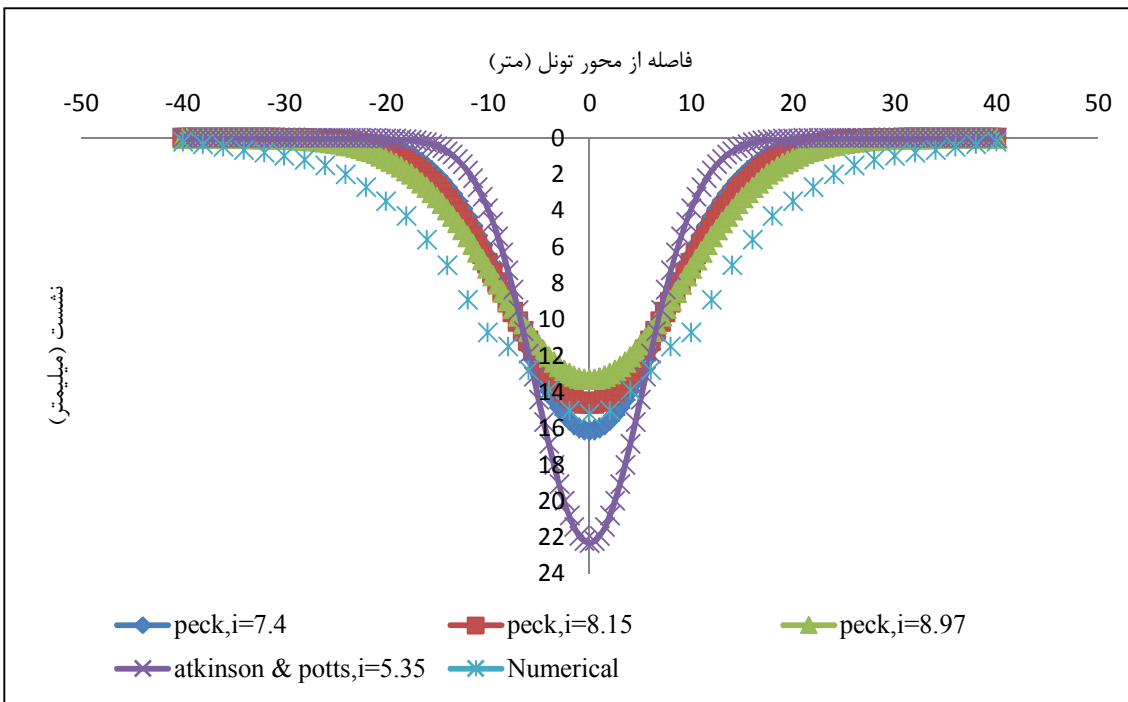
می‌یابد. بیشترین تطابق حاصل با نتایج مدل عددی در میزان فاکتور تصحیح ۰/۱ بدست می‌آید.



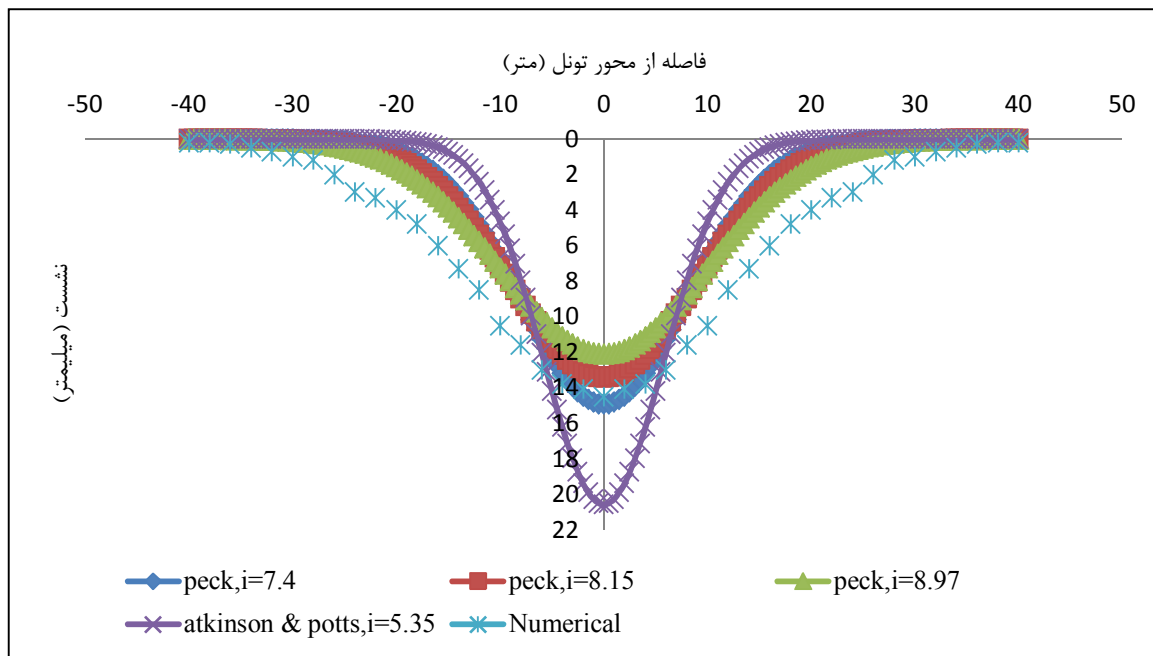
شکل (۶-۹): ماکزیمم نشست نسبت به فاکتور تصحیح در روش لاگاناتان و پولوس

۳-۶ روش تجربی پک

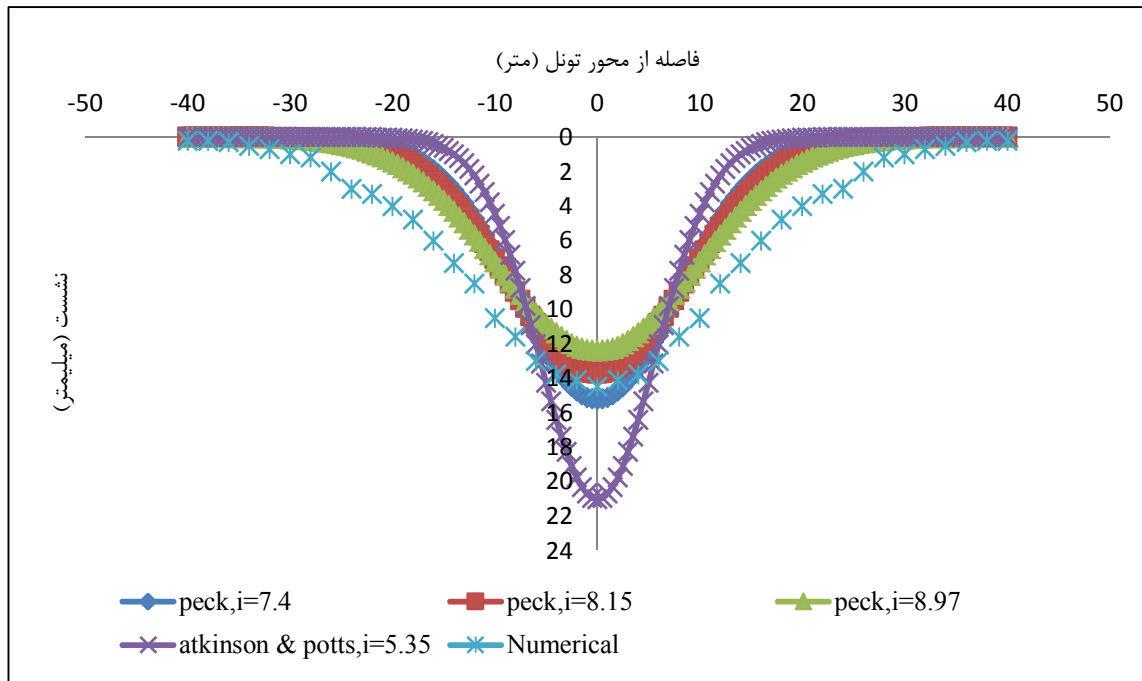
با توجه به شکل‌های (۶-۱۰)، (۶-۱۱)، (۶-۱۲) و (۶-۱۳)، نشست بدست آمده با مدل عددی برای افت حجم 0.088 ٪، در مقطع ۱، ۲ و ۳ با مقدار نشست بدست آمده با روش تجربی پک ($i=7/4$) و در مقطع ۴ با روش تجربی پک ($i=8/15$) سازگار می‌باشد و همچنین در تمامی مقاطع با مقدار نشست بدست آمده با روش اتکینسون و پوتس تفاوت زیادی دارد.



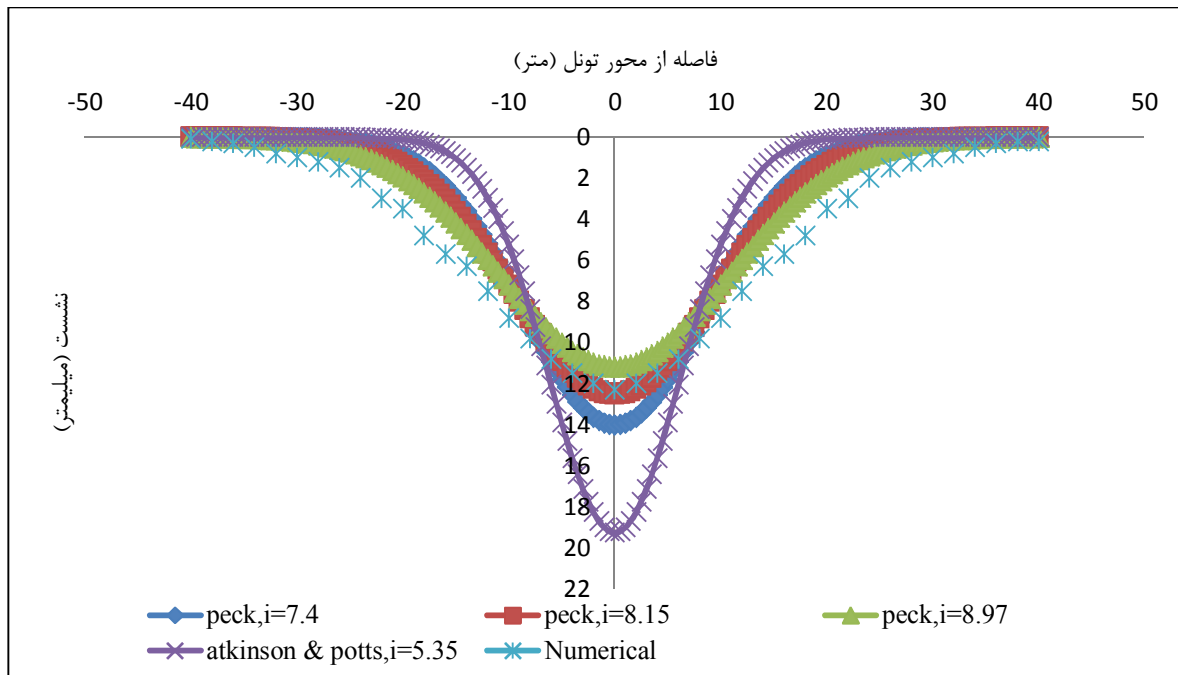
شکل (۶-۱۰): نمودارهای نشست سطح زمین با روش پک برای مقطع ۱



شکل (۶-۱۱): نمودارهای نشست سطح زمین با روش پک برای مقطع ۲



شکل (۶-۱۲): نمودارهای نشست سطح زمین با روش پک برای مقطع ۳



شکل (۶-۱۳): نمودارهای نشست سطح زمین با روش پک برای مقطع ۴

با توجه به نمودارهای نشست بدست آمده از روش تجربی پک برای ۴ مقطع بحرانی مورد بررسی، میزان نشست ماکزیمم برای این ۴ مقطع با توجه به عمق قرارگیری تونل (Z_0)، مقدار پارامتر i و V_L در جدول‌های (۵-۶)، (۶-۶)، (۷-۶) و (۸-۶) آورده شده است.

جدول (۵-۶): نتایج نشست با روش پک برای مقطع ۱

مقطع	لایه خاک غالب	$Z_0(m)$	$i(m)$	$V_L(\%)$	$S_{max}(mm)$
۱	sand	۱۷/۹۴	۵/۳۵	۰/۸۸	۲۲/۳
۱	sand	۱۷/۹۴	۷/۴۰	۰/۸۸	۱۶/۱۲
۱	sand	۱۷/۹۴	۸/۱۵	۰/۸۸	۱۴/۶۴
۱	sand	۱۷/۹۴	۸/۹۷	۰/۸۸	۱۳/۳
۱	sand	۱۷/۹۴	۵/۳۵	۱	۲۷/۸۷
۱	sand	۱۷/۹۴	۷/۴۰	۱	۲۰/۱۵
۱	sand	۱۷/۹۴	۸/۱۵	۱	۱۸/۳
۱	sand	۱۷/۹۴	۸/۹۷	۱	۱۶/۶۲
۱	sand	۱۷/۹۴	۵/۳۵	۱/۳	۳۶/۲۳
۱	sand	۱۷/۹۴	۷/۴۰	۱/۳	۲۶/۱۹
۱	sand	۱۷/۹۴	۸/۱۵	۱/۳	۲۳/۷۸
۱	sand	۱۷/۹۴	۸/۹۷	۱/۳	۲۱/۶۱
۱	sand	۱۷/۹۴	۵/۳۵	۱/۵	۴۱/۸۰
۱	sand	۱۷/۹۴	۷/۴۰	۱/۵	۳۰/۲۲
۱	sand	۱۷/۹۴	۸/۱۵	۱/۵	۲۷/۴۴
۱	sand	۱۷/۹۴	۸/۹۷	۱/۵	۲۴/۹۳

جدول (۶-۶): نتایج نشست با روش پک برای مقطع ۲

مقطع	لایه خاک غالب	$Z_0(m)$	$i(m)$	$V_L(\%)$	$S_{max}(mm)$
۲	sand	۱۹/۷۴	۵/۸	۰/۸۸	۲۰/۵۷
۲	sand	۱۹/۷۴	۷/۹۹	۰/۸۸	۱۴/۹۳
۲	sand	۱۹/۷۴	۸/۸۸	۰/۸۸	۱۳/۴۳
۲	sand	۱۹/۷۴	۹/۸۷	۰/۸۸	۱۲/۰۸
۲	sand	۱۹/۷۴	۵/۸	۱	۲۵/۷۱
۲	sand	۱۹/۷۴	۷/۹۹	۱	۱۸/۶۶

ادامه جدول (۶-۶)

۱۶/۷۹	۱	۸/۸۸	۱۹/۷۴	sand	۲
۱۵/۱۱	۱	۹/۸۷	۱۹/۷۴	sand	۲
۳۳/۴۲	۱/۳	۵/۸	۱۹/۷۴	sand	۲
۲۴/۲۶	۱/۳	۷/۹۹	۱۹/۷۴	sand	۲
۲۱/۸۲	۱/۳	۸/۸۸	۱۹/۷۴	sand	۲
۱۹/۶۴	۱/۳	۹/۸۷	۱۹/۷۴	sand	۲
۳۸/۵۶	۱/۵	۵/۸	۱۹/۷۴	sand	۲
۲۷/۹۹	۱/۵	۷/۹۹	۱۹/۷۴	sand	۲
۲۵/۱۹	۱/۵	۸/۸۸	۱۹/۷۴	sand	۲
۲۲/۶۶	۱/۵	۹/۸۷	۱۹/۷۴	sand	۲

جدول (۶-۷) : نتایج نشست با روش پیک برای مقطع ۳

S _{max} (mm)	V _L (%)	i(m)	Z ₀ (m)	لایه خاک غالب	مقطع
۲۱/۰۴	۰/۸۸	۵/۶۷	۱۹/۲۴	sand	۳
۱۵/۲۳	۰/۸۸	۷/۸۳	۱۹/۲۴	sand	۳
۱۳/۷۴	۰/۸۸	۸/۶۸	۱۹/۲۴	sand	۳
۱۲/۴	۰/۸۸	۹/۶۲	۱۹/۲۴	sand	۳
۲۶/۳	۱	۵/۶۷	۱۹/۲۴	sand	۳
۱۹/۰۴	۱	۷/۸۳	۱۹/۲۴	sand	۳
۱۷/۱۸	۱	۸/۶۸	۱۹/۲۴	sand	۳
۱۵/۵	۱	۹/۶۲	۱۹/۲۴	sand	۳
۳۴/۱۹	۱/۳	۵/۶۷	۱۹/۲۴	sand	۳
۲۴/۷۵	۱/۳	۷/۸۳	۱۹/۲۴	sand	۳
۲۲/۳۳	۱/۳	۸/۶۸	۱۹/۲۴	sand	۳
۲۰/۱۵	۱/۳	۹/۶۲	۱۹/۲۴	sand	۳
۳۹/۴۵	۱/۵	۵/۶۷	۱۹/۲۴	sand	۳
۲۸/۵۶	۱/۵	۷/۸۳	۱۹/۲۴	sand	۳
۲۵/۷۷	۱/۵	۸/۶۸	۱۹/۲۴	sand	۳
۲۳/۲۵	۱/۵	۹/۶۲	۱۹/۲۴	sand	۳

جدول (۶-۸): نتایج نشست با روش پک برای مقطع ۴

S _{max} (mm)	V _L (%)	i(m)	Z ₀ (m)	لایه خاک غالب	مقطع
۱۹/۲۴	۰/۸۸	۶/۲۰	۲۱/۳۴	sand	۴
۱۴/۰۲	۰/۸۸	۸/۵۱	۲۱/۳۴	sand	۴
۱۲/۵۲	۰/۸۸	۹/۵۳	۲۱/۳۴	sand	۴
۱۱/۱۸	۰/۸۸	۱۰/۶۷	۲۱/۳۴	sand	۴
۲۴/۰۵	۱	۶/۲۰	۲۱/۳۴	sand	۴
۱۷/۵۲	۱	۸/۵۱	۲۱/۳۴	sand	۴
۱۵/۶۴	۱	۹/۵۳	۲۱/۳۴	sand	۴
۱۳/۹۷	۱	۱۰/۶۷	۲۱/۳۴	sand	۴
۳۱/۲۶	۱/۳	۶/۲۰	۲۱/۳۴	sand	۴
۲۲/۸	۱/۳	۸/۵۱	۲۱/۳۴	sand	۴
۲۰/۳۴	۱/۳	۹/۵۳	۲۱/۳۴	sand	۴
۱۸/۱۷	۱/۳	۱۰/۶۷	۲۱/۳۴	sand	۴
۳۶/۰۷	۱/۵	۶/۲۰	۲۱/۳۴	sand	۴
۲۶/۲۸	۱/۵	۸/۵۱	۲۱/۳۴	sand	۴
۲۳/۴۷	۱/۵	۹/۵۳	۲۱/۳۴	sand	۴
۲۰/۹۶	۱/۵	۱۰/۶۷	۲۱/۳۴	sand	۴

با توجه به جدول‌های (۵-۶)، (۶-۶)، (۶-۷) و (۶-۸) برای یک مقدار ثابت افت حجم با کاهش پارامتر پهنای نشست، ماکزیمم نشست افزایش می‌یابد و با افزایش پهنای نشست، ماکزیمم نشست کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان افت حجم، ماکزیمم نشست افزایش می‌یابد. بیشترین تطابق با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در میزان افت حجم کمتر از ۱٪ و با پارامتر پهنای نشست تعریف شده توسط آقای پک بدست می‌آید.

۴-۶ نتیجه‌گیری

- بین ماکزیمم نشست پیش‌بینی شده با روش پک و ماکزیمم نشست پیش‌بینی شده با روش عددی به ازای مقادیر مختلف افت حجم هماهنگی خوبی وجود دارد. یعنی به ازای افت حجم‌های مختلف نشست پیش‌بینی شده با روش پک و روش عددی تقریباً نزدیک می‌باشند.

- ماکزیمم نشست پیش‌بینی شده با روش پک و با استفاده از پارامتر پهنای نشست تعریف شده توسط آقای اتکینسون و پوتس با روش عددی تفاوت زیادی وجود دارد و با افزایش افت حجم این تفاوت افزایش می‌یابد.

- با توجه به روش لاگاناتان و پولوس، فاکتور تصحیح و میزان پارامتر گپ تاثیر زیادی بر روی منحنی نشست دارد و با افزایش فاکتور تصحیح ماکزیمم نشست افزایش می‌یابد.

- در کل از میان روش‌های تجربی، روش پک و از میان روش‌های تحلیلی، روش لاگاناتان و پولوس، ماکزیمم نشست دقیق‌تری را تخمین می‌زنند.

فصل هفتم

مدلسازی عددی و تحلیل مسائل مربوط به

نشست ناشی از تونلسازی

۷ فصل پنجم: مدلسازی عددی و تحلیل مسائل مربوط به نشست ناشی از

تونلسازی

۱-۷ مدلسازی عددی

۱-۱-۷ مقدمه

همان‌طور که اشاره شد یکی از روش‌های پیش‌بینی نشست استفاده از روش‌های عددی می‌باشد. روش‌های عددی با لحاظ کردن خواص ژئومکانیکی مواد و همچنین شرایط مرزی مسئله مورد مطالعه و دستگاه (فشار تزریق و فشار سینه‌کار) و قابلیت شبیه‌سازی هندسه‌های مختلف و همچنین مسائل غیرخطی منجر به جواب‌های نزدیک به واقعیت می‌شود که برخلاف روش‌های تحلیلی و تجربی امکان تطبیق دادن اجزاء مختلف مسائل اندرکنش در یک تحلیل را فراهم می‌آورد. روش‌های عددی خود مشتمل بر تکنیک‌های المان محدود (FEM)، المان مرزی (BEM)، المان مجزا (DEM) و تفاضل محدود (FDM) می‌باشند. که در این پایان‌نامه به این دلیل که محیط در برگیرنده سازه محیط پیوسته است از تکنیک المان محدود (FEM) به منظور مدلسازی مسئله مورد نظر استفاده شده است.

۲-۱-۷ روش FEM

روش اجزاء محدود یا روش المان محدود^۱ (FEM)، روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی که امروزه کاربردهای فراوانی در صنعت یافته است. در این روش با حذف کامل معادلات دیفرانسیل و یا تبدیل آن به معادلات دیفرانسیلی معمولی مقادیر عددی بدست می‌آیند و از آن برای تحلیل سیستم‌های مختلف بهره برده می‌شود. برای اینکه هر جسم در روش المان محدود تحلیل شود ابتدا می‌بایست آن را به اجزای کوچکتری که المان نامیده می‌شود تقسیم کنیم.

¹ Finite Element Method

این اجزا یا المان‌ها، در تعداد نقاط محدودی به هم اتصال پیدا می‌کنند که به آن‌ها گره^۱ گفته می‌شود. سپس معادلات حاکم بر حرکت هر یک از گره‌ها بدست آمده و به صورت هم‌زمان (چند معادله‌ی چند مجهولی) حل می‌شود و در نهایت نیز با تحلیل جواب‌های عددی معادلات، نتایج مورد نظر بدست می‌آیند.

با بدست آمدن حل عددی معادلات حاکم بر هر یک از گره‌های اطراف یک المان، رفتار آن المان مشخص می‌شود و در نهایت با کنار هم قرار دادن نتایج حاصل از همه‌ی المان‌ها، رفتار یک سیستم فیزیکی تحت عملی خاص بدست می‌آید. از آنجا که سیستم فیزیکی به المان‌ها و گره‌ها تقسیم می‌شود، همه‌ی بارها و اثرات خارجی (شرایط مرزی) نیز می‌بایست تبدیل به مقادیر گره‌ای و المانی شوند. نیروهای متمرکزی چون F بر یک گره اعمال می‌شوند اما نیروهای فشاری چون P به صورت مساوی به هر یک از گره‌های محدوده‌ی اثر، اعمال خواهند شد. نرم افزار Plaxis نیز بر اساس این روش عمل می‌کند [۲۵].

۳-۱-۷ معرفی نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL

Plaxis 3D tunnel یک بسته نرم‌افزاری اجزاء محدود بوده که به منظور تجزیه و تحلیل تغییر شکل و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک ابداع شده است. در این بسته، مراحل ساده ورود اطلاعات تصویری و گراف‌ها باعث تسریع تولید مدل‌های پیچیده اجزاء محدود شده و تسهیل بیش از حد خروجی، نمایش مشروح و مفصل نتایج محاسباتی را فراهم آورده است. محاسبات کاملاً خودکار صورت گرفته و بر روش‌های حسابی مستحکم و مستدل تکیه دارد. این نرم‌افزار شامل چهار زیر برنامه (ورودی، محاسبات، خروجی و نمودارها) می‌باشد [۲۶].

مدلسازی و تجزیه و تحلیل هر پروژه در این نرم‌افزار نیازمند اجرای مراحل زیر می‌باشد:

- ساختن هندسه مدل ؛

¹ Node

- اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه ؛

- مش بندی مدل ؛

- شبیه سازی مراحل ساخت ؛

- محاسبات و گرفتن خروجی ها.

به منظور شبیه سازی مراحل ساخت تونل، می توان با فعال و یا غیر فعال کردن بخشی از مدل، بار یا تغییر در تراز آب، ساخت مدل را مطابق شرایط ساخت و بهره برداری شبیه سازی کرد. این کار باعث می شود که تنش ها و جابجایی های ایجاد شده به واقعیت نزدیکتر باشد.

بعد از ساخت مدل المان محدود نوبت به محاسبات آن می رسد، که نیازمند آن است که نوع محاسبه و نوع بارگذاری تعیین شود. این کارها در بخش محاسباتی برنامه انجام می شود. بخش اصلی، خروجی محاسبات المان محدود شامل جابجایی در گره ها و میزان تنش در نقاط تنش است. اگر مدل دارای عناصر سازه ای نیز باشد، نیرو و تغییر شکل در این المان ها نیز محاسبه می گردد [۲۶].

۲-۷ مدل سازی عددی مقاطع مورد مطالعه خط یک مترو تبریز

۱-۲-۷ روند مدل سازی مسئله مورد نظر

برای انجام مدل سازی عددی پروژه از یکسری پیش فرض های خاصی استفاده شده است، که بر اساس این پیش فرض ها مدل سازی مسئله مورد نظر صورت گرفته است.

۱-۱-۲-۷ کالیبراسیون مدل

برای بدست آوردن ابعاد مدل بهینه به منظور محاسبه دقیق منحنی نشست ساختمان 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 مطابق جدول (۱-۷) انجام شد. برای این منظور به دلیل اینکه بیشترین تعداد طبقات ساختمان های مسیر پروژه مربوط به ساختمان های دو طبقه بود و همچنین به

دلیل در نظر گرفتن تاثیر همزمان چند ساختمان بر روی منحنی نشست، دو ساختمان با مشخصات جدول (۲-۷) برای مدلسازی انتخاب شد. مقدار باری که ساختمان وارد می‌کند بر اساس استاندارد ASHTO جدول (۳-۷) به مدل اعمال شده است.

جدول (۱-۷): تحلیل حساسیت به منظور بدست آوردن ابعاد مدل بهینه

$\alpha = \frac{S}{S_{max}}$	$S_{max}(mm)$	$S(mm)$	تحلیل حساسیت
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

(D: قطر تونل)

جدول (۲-۷): مشخصات ساختمان برای کالیبراسیون

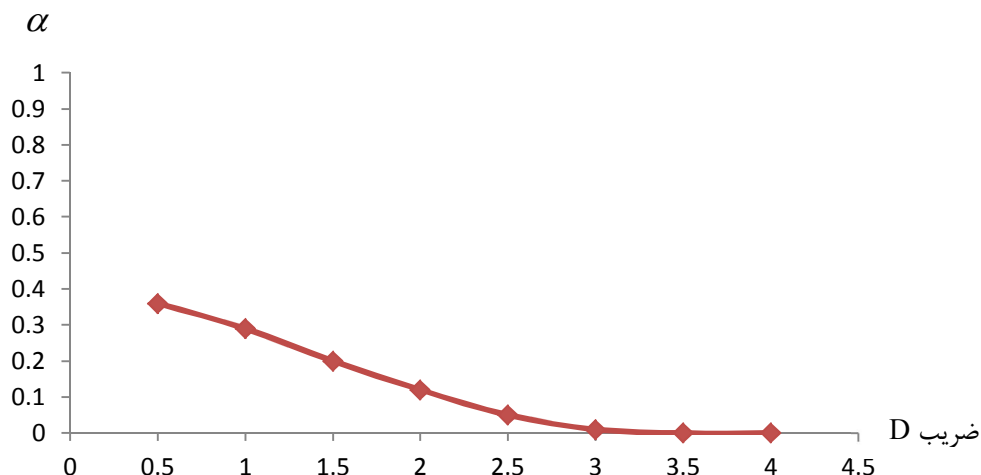
شماره ساختمان	ابعاد ساختمان	تعداد طبقات
۱	۱۰×۱۶	۲
۲	۶×۱۰	۱

جدول (۳-۷): استاندارد بارگذاری (ASHTO, ۲۰۰۲) [۲۷]

منبع بارگذاری	فشار توزیع یکنواخت
راه آهن	۲۰ کیلو پاسکال
جاده اصلی و بزرگراه	۲۰ کیلو پاسکال (دائمی)، ۱۰ کیلو پاسکال (موقت)
جاده اصلی و پیچ	۱۰ کیلو پاسکال
پیاپیاده رو	۵ کیلو پاسکال
ساختمان	۱۰ کیلو پاسکال برای هر طبقه

در جهت طولی، در فاصله مشخصی از پشت سینه کار تونل شرایط نشست به حالت ایستا می‌رسد. مقادیر متفاوتی برای این فاصله در مطالعات مختلف گزارش شده است. دساری و همکاران بیان کردند که شرایط نشست ایستا در فاصله ۲D پشت سینه کار تونل برقرار می‌شود، در حالیکه ورمر و همکاران

(۲۰۰۲) این فاصله را در حدود ۵D معرفی کردند. اما در این تحقیق با تحلیل حساسیت انجام گرفته در فواصل مختلف در راستای طولی مدل (با ثابت گرفتن عرض و عمق مدل) بر اساس موقعیت قرارگیری ساختمان همان طور که در شکل (۷-۱) نشان داده شده است میزان نشست در فاصله ۳D از مقطع ابتدایی ساختمان‌ها ایستا می‌شود.



شکل (۷-۱): تغییرات نسبت نشست برای فواصل مختلف از مرز مدل

۲-۱-۲-۷ انتخاب مدل رفتاری

برنامه PLAXIS مدل‌های رفتاری خاک از مدل الاستیک خطی ساده تا مدل الاستو پلاستیک را شامل می‌شود. نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و برجا نشان می‌دهد که خاک محدوده پروژه در رده خاک‌های بسیار سخت و متراکم قرار می‌گیرد. بر اساس توصیه‌های نرم‌افزار، این نوع خاک تطابق خوبی با مدل رفتاری خاک سخت‌شونده دارد، بنابراین به منظور مدل‌سازی رفتار خاک از این مدل رفتاری استفاده شده است.

از مهم‌ترین مزیت‌های مدل سخت‌شونده نسبت به مدل موهر کلمب می‌توان به این موارد اشاره کرد:
 ۱. استفاده از تئوری پلاستیسیته به جای تئوری الاستیسیته ۲. مدل‌سازی اتساع خاک ۳. در نظر گرفتن

yield cap . مهم‌ترین خصوصیت مدل HS مرتبط ساختن مدول سختی خاک با تنش موجود در خاک است.

۳-۱-۲-۷ سختی اندرکنش (R_{inter})

در نرم‌افزار Plaxis به دلیل در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک با دستگاه و خاک با سگمنت یک سختی اندرکنش یا ضریب کاهش مقاومت اندرکنش (R_{inter}) تعریف شده است که مقداری بین ۰/۵-۱ می‌باشد. خصوصیات مقاومتی اندرکنش به خصوصیات مقاومتی لایه خاک ارتباط داده می‌شود. ضریب کاهش مقاومت اندرکنش با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید:

$$C_i = R_{inter} \cdot C_{soil}$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \cdot \tan \varphi_{soil}$$

که در این فرمول‌ها C_i و φ_i به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در اندرکنش می‌باشد. بر

اساس توصیه نرم‌افزار مقادیر مختلف R_{inter} به شرح جدول (۴-۷) می‌باشد [۲۶]:

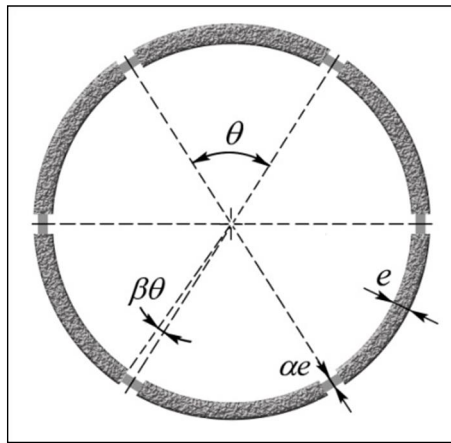
جدول (۴-۷): مقادیر مختلف اندرکنش [۲۶]

R_{inter}	اندرکنش
۰/۶-۰/۷	Sand/steel
۰/۵	Clay/steel
۰/۸-۱	Sand/concrete
۰/۷-۱	Clay/concrete
۱	Soil/geogrid
۰/۵-۰/۹	Soil/geotextile

۴-۱-۲-۷ سیستم نگهداری

در نرم‌افزار Plaxis برای مدلسازی سیستم نگهداری، ۴ پارامتر ورودی باید به نرم‌افزار داده شود. سختی محوری EA، سختی خمشی EI، وزن در واحد طول W و ضریب پواسون ν ، و پارامتر ضخامت معادل d نیز بصورت خودکار توسط نرم‌افزار محاسبه می‌گردد.

از نقطه نظر مکانیکی فشار وارد از طرف زمین در اتصالات طولی بین سگمنت‌ها، ایجاد نیروهای محوری فشاری و لنگر خمشی می‌کند. نکته مهم آن است که، میزان خمش در نزدیکی این اتصالات به علت کم شدن ممان اینرسی مقطع کاهش می‌یابد. لذا این اتصالات را همان‌گونه که در شکل (۲-۷) نشان داده شده است، می‌توان به وسیله مناطق با ضخامت کاهش یافته، مطابق با سطح تماس سگمنت‌ها در یک حلقه مدل کرد [۲۸].



شکل (۲-۷): مدلی از یک حلقه پوشش بتنی با قطعات یکسان و منظم [۲۸]

Muir Wood (۱۹۷۲) برای برآورد تاثیر اتصالات طولی حلقه‌های جفت نشده در محاسبات مربوط به یک حلقه صلب همسانگرد، به واسطه کاهش سختی خمشی پوشش، رابطه تجربی (۱-۷) را ارائه کرد، که مدول الاستیسیته معادل E از این رابطه بدست می‌آید:

$$E = \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta) + \beta} E_m \quad (1-7)$$

که مطابق شکل (۲-۷)، در آن αe ضخامت مربوط به قسمت باریک اتصالات طولی، e ضخامت حلقه پوشش، $\beta \theta R$ پهناي دایره‌ای متوسط هر اتصال طولی، θ زاویه مرکزی مربوط به هر تکه حلقه، E_m مدول الاستیسیته ماده سازنده حلقه، α و β ضرایب ثابت هستند. با توجه به محاسبات انجام گرفته توسط Muir Wood مقدار β برای پوششی که متشکل از ۶ سگمنت است، برابر 10^{-3} خواهد بود. مطابق با آنالیز حساسیت انجام شده توسط سالمی مقدار پارامتر αe در بازه‌ای بین $\frac{1}{8} - \frac{1}{16}$ بدست آمد، که در این پایان‌نامه مقدار متوسط بازه پیشنهادی یعنی $\frac{1}{12}$ به منظور مدل‌سازی سیستم نگهداری استفاده شده است [۲۹]. ممان اینرسی معادل (I_e) به منظور محاسبه سختی خمشی از رابطه (۲-۷) حاصل می‌شود.

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \frac{e^3}{12} \quad (2-7)$$

که در آن I_j ، ممان اینرسی در اتصالات بین سگمنت‌ها و n تعداد اتصالات موجود در هر حلقه است. این فرمول برای $n > 4$ قابل قبول است. اگر در محل اتصالات، ممان اینرسی به صورت $I_j = \frac{\alpha^3 e^3}{12}$ در نظر گرفته شود، خواهیم داشت:

$$I_e = \left[\alpha^3 + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \right] \frac{e^3}{12} \quad (3-7)$$

در جدول (۵-۷) پارامترهای مربوط به یک پوشش یک‌پارچه و پوشش سگمنتال محاسبه شده درج شده است (مقدار E_m برابر $2/35 \times 10^6$ کیلو نیوتن بر متر مربع می‌باشد).

جدول (۷-۵): پارامترهای سیستم نگهداری

ضریب پواسون (ν)	وزن حجمی W(kN/m/m)	ضخامت معادل d(m)	نوع المان	سختی خمشی EI(kNm ² /m)	سختی محوری EA(kN/m)	نوع پوشش
۰/۲	۷/۵	۰/۳	Elastic	۵۳۰۰۰	۷/۰۵×۱۰ ^۶	پوشش یکپارچه
۰/۲	۷/۵	۰/۳	Elastic	۲۳۴۰۰	۱/۹۶×۱۰ ^۶	پوشش سگمنتال

در این پایان‌نامه به منظور انطباق بیشتر نتایج حاصل از مدلسازی عددی با نتایج واقعی از مشخصات پوشش سگمنتال برای مدلسازی سیستم نگهداری استفاده شده است.

۷-۱-۲-۵ 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 در مرزهای حفاری اتفاق می‌افتد که باید در مدلسازی بطور صحیح لحاظ گردد. 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 می‌باشد. نکته مهمی که در تونلسازی با عمق کم در مصالح دانه‌ای باید به آن توجه کرد این است که در اینگونه موارد، همان‌طور که هوک نیز اشاره کرده‌اند پروسه‌ای به نام ترخیص تنش و اندرکنش سیستم نگهداری و محیط وجود ندارد و در حقیقت کل روباره بطور یکجا به سیستم نگهداری وارد می‌شود.

میزان V_L به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{V_{\text{excavation}} - V_x}{V_{\text{excavation}}} = V_L \% \quad (۴-۷)$$

$$V_{\text{excavation}} = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (۵-۷)$$

$$V_x = \frac{\pi}{4} D_x^2 \quad (۶-۷)$$

که در آن:

$V_{excavation}$: حجم حفاری شده تونل، V_x : حجم تونل پس از همگرایی، D : قطر حفاری تونل و D_x :

قطر تونل پس از همگرایی می‌باشد.

با توجه به قطر حفاری تونل و قطر تونل پس از ماکزیمم همگرایی مقدار افت حجم برابر 0.88% :

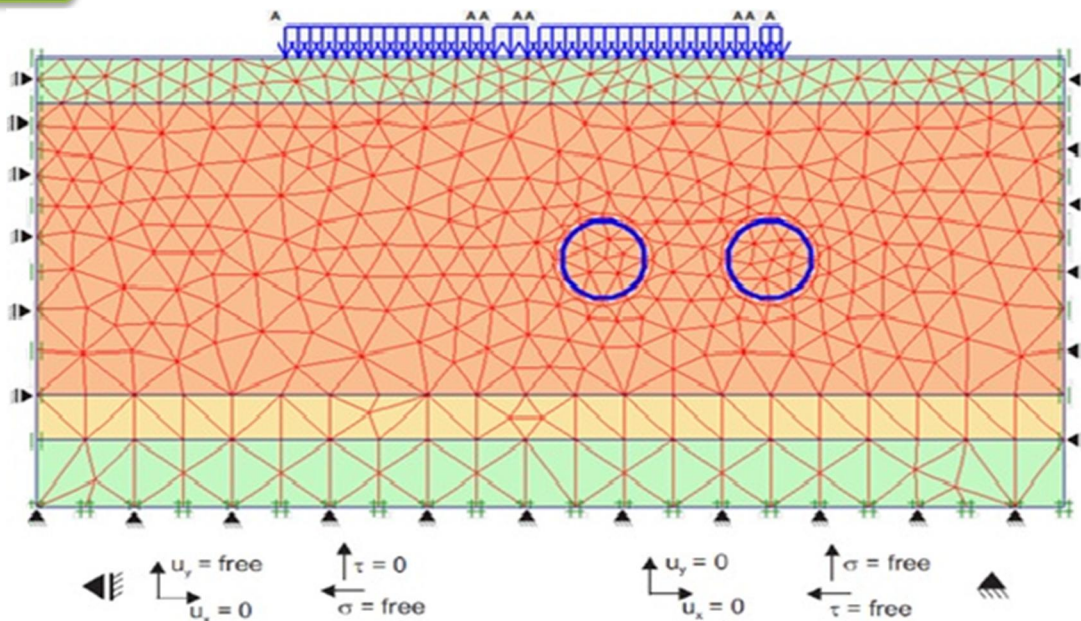
بدست آمد.

۲-۲-۷ تعیین هندسه مدل اجزاء محدود تونل‌های خط یک مترو تبریز در مقاطع مورد مطالعه

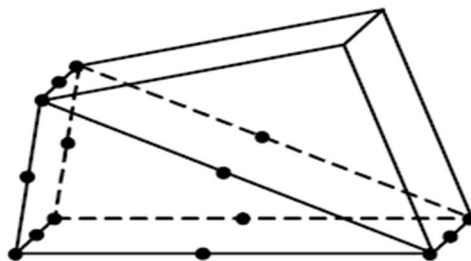
به منظور تحلیل عددی نشست ساختمان‌ها در حوالی تونل‌های دوقلو خط یک متروی تبریز، یک شبکه اجزاء محدود برای هر یک از مقاطع بحرانی انتخاب شده ایجاد گردید. همچنین برای اجتناب از تاثیر مرزهای مدل بر نتایج تحلیل، متناسب با ابعاد ساختمان‌ها در راستای طولی و عرضی (با در نظر گرفتن ابعاد مدل بهینه)، ابعاد مدل در ۴ مقطع به صورت متغیر تعیین گردید.

شرایط مرزی و اولیه، شامل کلیه بارها، نیروها و جابجایی‌های معین در محیط مدل است که در فرایند تحلیل باید به مدل اعمال گردد. به منظور اعمال شرایط مرزی نیز از مرزهای استاندارد موجود در نرم‌افزار استفاده شده است. در این نوع شرایط مرزی، جابجایی مرزهای کناری در جهت y آزاد بوده و در جهت x ثابت می‌شوند. مرز پائین نیز در همه جهات ثابت، و مرز بالایی آزاد گذاشته می‌شود (شکل (۳-۷)).

نرم‌افزار Plaxis انواع مش‌بندی خیلی درشت، درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز را شامل می‌شود و به شکل کاملاً خودکار مش‌بندی را انجام داده و این امکان برای کاربر وجود دارد که مش‌بندی بخش خاصی را ریزتر نماید. نوع المان‌ها مثلثی ۱۵ گره‌ای بوده، همان‌طور که در شکل (۴-۷) نشان داده شده است این المان‌ها دارای ۶ گره در صفحه $x-y$ و ۹ گره در جهت z هستند، که دارای قابلیت بالایی برای شبیه‌سازی پاسخ محیط‌های خاکی در برابر تغییرات تنش می‌باشند.



شکل (۷-۳): شرایط مرزی اعمال شده به مدل



شکل (۷-۴): موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در المان‌ها [۲۶]

در جدول (۷-۶) حداقل و حداکثر فاصله سازه‌ها نسبت به تونل‌های حفر شده مشاهده می‌گردد.

جدول (۷-۶): فاصله سازه‌ها از محور تونل

شماره ساختمان	حداقل فاصله از محور تونل (متر)	حداکثر فاصله از محور تونل (متر)
۳	۳/۷۶	۶/۲۴
۴	۱۶/۲۴	۳۰
۵	۳/۲۸	۱۷/۰۴
۶	۴	۹/۷۶
۲۱	۷	۲۰/۷۶

ادامه جدول (۶-۷)

۲۳/۷۶	۱۰	۲۲
۷/۷۶	۶	۲۳
۸/۷۶	۵	۳۲
۳۳	۱۹/۲۴	۳۳
۲۱	۲/۲۴	۳۴
۲۰/۷۶	۷	۴۰
۳۰/۷۶	۱۷	۴۱
۷/۴۴	۶/۳۲	۴۲
۱۴/۴۴	۵/۳۲	۴۳

۳-۲-۷ ارزیابی تاثیر مراحل مختلف حفاری بر نشست سطح زمین و پی سازه‌ها در مقاطع

مورد بررسی

در این تحقیق پس از ایجاد مدل نهایی که شامل ساخت هندسه مدل، اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، اعمال بارهای سطحی، مش‌بندی مدل و شرایط اولیه می‌باشد، نوبت به شبیه‌سازی مراحل ساخت و محاسبات و گرفتن خروجی‌ها می‌رسد.

در مقاطع مورد مطالعه ما دو تونل سه‌پند و سبلان مدل‌سازی شده‌اند. تونل سه‌پند همان تونل رفت می‌باشد که ابتدا این تونل حفاری شده است و با فاصله زمانی حدود چند ماه تونل برگشت (سبلان) حفاری شده است. در این تحقیق نیز ابتدا تونل رفت (سه‌پند) تا انتهای مدل حفاری شد و سپس تونل برگشت (سبلان) حفاری گردید. در نرم‌افزار Plaxis محاسبات به فازهای مختلف تقسیم می‌شود. از وظایف فازهای محاسباتی می‌توان فعال کردن یک سیستم بارگذاری مشخص، مدل‌سازی مراحل ساختمان، فعال کردن شیلد دستگاه و سیستم نگهداری را نام برد. فازهای محاسباتی در این پایان‌نامه برای تمام مقاطع شامل مراحل زیر می‌باشد:

- در مرحله اول سازه‌های سطحی فعال می‌شوند. هدف از این فاز رسیدن به حالت تعادل اولیه است. لازم به ذکر است که پس از پایان این مرحله نشست‌ها به صفر تنظیم و به منظور محاسبه دقیق نشست حاصل از حفاری، مقادیر اندازه‌گیری شده برای نقاط مختلف نسبت به این فاز محاسبه شده‌اند.

- در مرحله دوم خاک درون تونل غیر فعال شده و سپر دستگاه حفاری فعال می‌شود.
- در مرحله سوم نیز سپر غیر فعال شده و هم‌زمان با غیر فعال کردن سپر، سیستم نگهداری تونل نصب و تزریق پشت سگمنت اعمال می‌شود.
- در مرحله چهارم (تکرار مرحله دوم و سوم) تونل دوم حفر می‌شود. قبل از تعریف هر فاز در این مرحله نشست‌های مراحل قبلی به صفر تنظیم می‌شود.

در تمامی مراحل پارامتر انقباض حجمی (V_L) که شامل کرنش حجمی و اثرات تغییر شکل زمین ناشی از شکل مخروطی سپر می‌باشد بر اساس مقدار محاسبه شده، هم‌چنین فشار سینه‌کار و فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت بر اساس مقادیر واقعی و عملیاتی به مدل اعمال می‌شود.

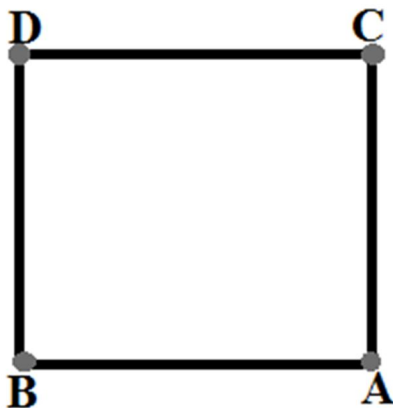
در این بخش به بررسی تاثیر وزن سازه‌های سطحی در مجاورت تونل و تاثیر متقابل تونلسازی بر تغییرات ایجاد شده بر روی ساختمان پرداخته می‌شود. هدف این است که تاثیر حفاری تمام مقطع تونل، قبل و بعد از عبور از زیر یا کنار ساختمان‌ها تحلیل گردد. این بررسی‌ها در تمام مقاطع شامل:

تحلیل نشست در حالت سطح آزاد^۱ (GF)، نشست حاصل از حفاری تونل اول با وجود ساختمان و نشست حاصل از حفاری تونل دوم با وجود ساختمان می‌شود.

در تحلیل نشست در حالت سطح آزاد، مقطعی از طول تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد که در تحلیل‌های بعدی نشست ساختمان‌ها در این مقاطع مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۱- زمین سطح آزاد به زمینی گفته می‌شود که هیچ سازه سطحی یا زیر سطحی در آن وجود نداشته باشد (Green Field).

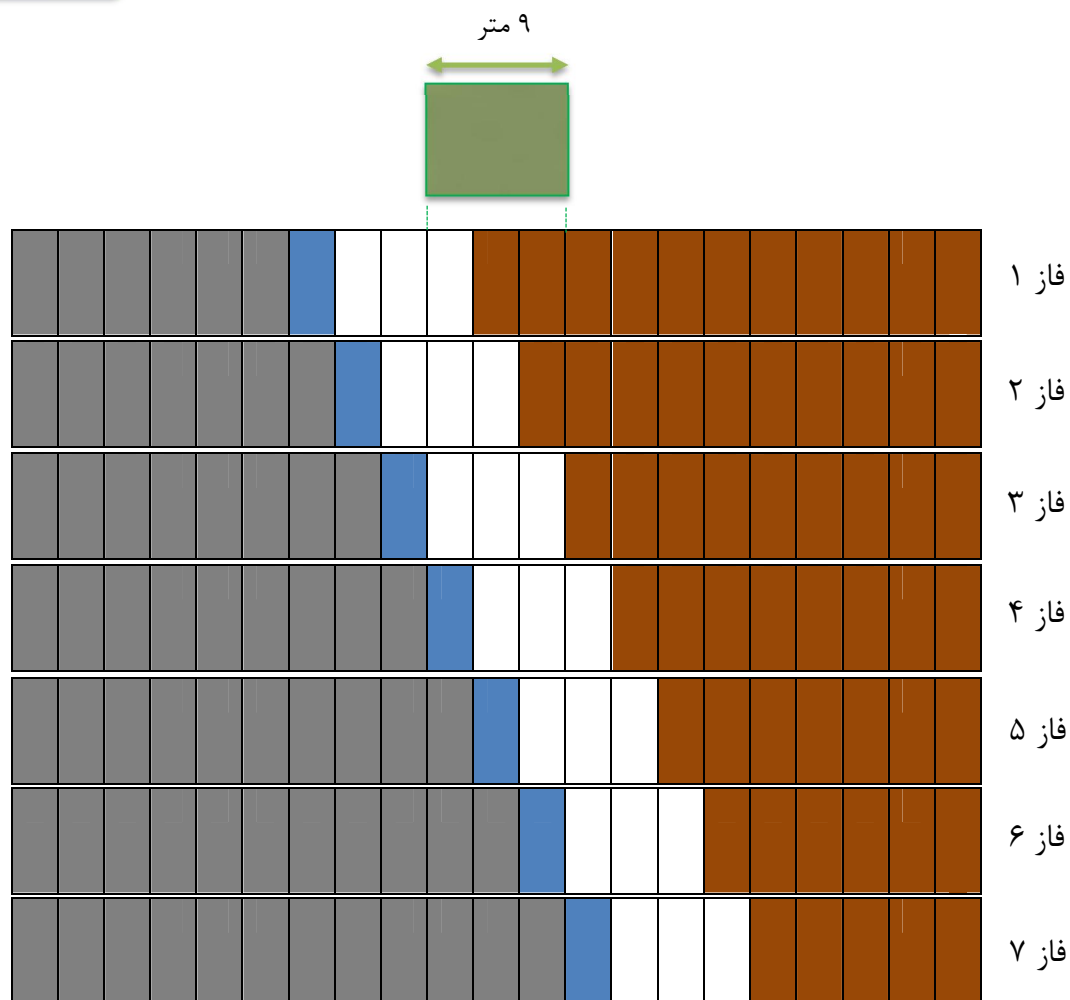
در تحلیل‌های نشست حاصل از حفاری تونل با وجود ساختمان هدف این است که تاثیر حفاری قسمت‌های هفت‌گانه مقطع تونل، هنگام عبور از زیر یا کنار ساختمان‌ها تحلیل گردد، که این هفت فاز در بخش بعدی توضیح داده شده است. همچنین به منظور ارزیابی تغییرات ایجاد شده در زیر پی ساختمان‌ها، ۴ نقطه تعیین گردیده است، که میزان نشست این نقاط در هر فاز حفاری بعد از حفر تونل اول و تونل دوم مورد بررسی قرار گرفته است، که محل این نقاط در شکل (۷-۵) نشان داده شده است.



شکل (۷-۵): نقاط تعیین شده در زیر پی ساختمان به منظور ارزیابی نشست‌ها

۷-۲-۳-۱ شبیه‌سازی مراحل حفاری

در این بخش شبیه‌سازی مراحل مختلف حفاری به منظور بررسی نشست‌ها برای یکی از ساختمان‌های مقاطع مورد بررسی به طول ۹ متر تشریح شده است، که بر این اساس تمامی ساختمان‌ها نیز به همین ترتیب مورد تحلیل و بررسی قرار خواهند گرفت. به همین منظور، فازهای مختلف حفاری و موقعیت ساختمان، هنگام عبور قسمت‌های مختلف مقطع تونل، در شکل (۷-۶) نشان شده است.

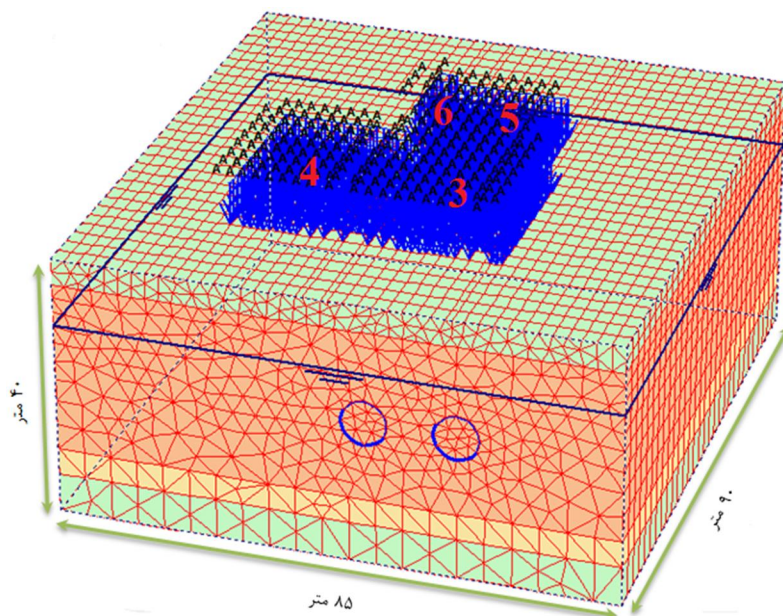


شکل (۶-۷): پلان مراحل مختلف حفاری هنگام عبور از زیر یا کنار ساختمان

فاز ۱ : رسیدن ۳ متر ابتدایی سپر به زیر ساختمان، فاز ۲ : رسیدن ۶ متر ابتدایی سپر به زیر ساختمان، فاز ۳ : رسیدن کل سپر به زیر ساختمان، فاز ۴ : گذر ۳ متر ابتدایی سپر از انتهای ساختمان و تزریق در ۳ متر ابتدایی ساختمان، فاز ۵ : گذر ۶ متر ابتدایی سپر از انتهای ساختمان و تزریق در ۳ متر میانی ساختمان و سگمنت گذاری ۳ متر ابتدایی ساختمان، فاز ۶ : گذر کل سپر از انتهای ساختمان و تزریق در ۳ متر انتهایی ساختمان و سگمنت گذاری ۳ متر میانی ساختمان، فاز ۷ : سگمنت گذاری ۳ متر انتهایی ساختمان.

۲-۳-۲-۷ تحلیل نشست ساختمان‌های مقطع ۱

طول، عرض و ارتفاع هندسه مدل برای این مقطع به ترتیب ۹۰ متر، ۸۵ متر و ۴۰ متر و نوع مش‌بندی متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر یک از تونل‌ها با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، ۳۰ فاز حفاری در نظر گرفته شده که در مجموع برای کل مدل ۶۰ فاز حفاری تا انتهای مدل صورت گرفته است. شکل (۷-۷) موقعیت ساختمان‌های مقطع شماره ۱ را نشان می‌دهد. مشخصات هندسی مدل ساخته شده و همچنین ضخامت پی ساختمان‌ها و تاثیر بار هر یک از ساختمان‌ها در مسیر حفاری برای مقطع ۱ به ترتیب در جدول (۷-۷) و (۸-۷) آورده شده است.



شکل (۷-۷): مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۱

جدول (۷-۷): مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۱

شماره مقطع	روباره (متر)	عمق کف تونل (متر)	عرض مدل (متر)	ارتفاع مدل (متر)	طول مدل (متر)	تعداد المان‌ها
۱	۱۴/۵	۲۱/۳۸	۹۵	۴۰	۹۰	۵۰۸۲

جدول (۷-۸): مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۱

شماره ساختمان	بار گسترده (KN)	ضخامت پی (m)
۳	۲۰	۰/۵
۴	۲۰	۰/۵
۵	۲۰	۰/۵
۶	۲۰	۰/۵

الف : تحلیل نشست در حالت سطح آزاد

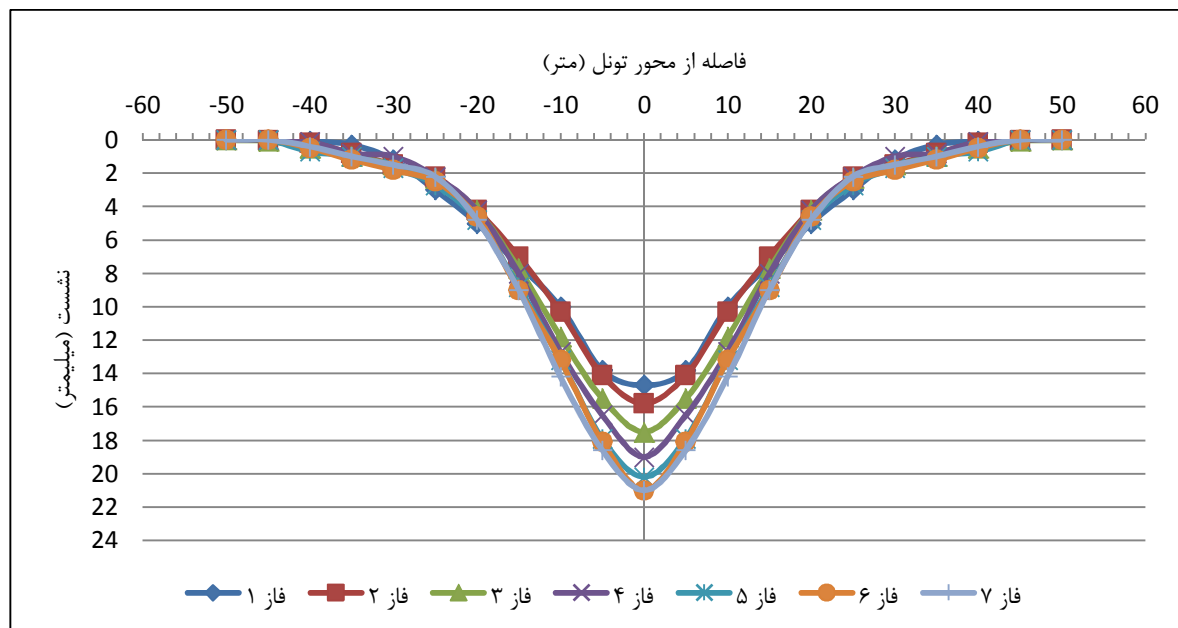
در این بخش از تحلیل‌ها، نشست سطح زمین در حالت بدون وجود ساختمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور با توجه به موقعیت قرارگیری ساختمان‌ها در راستای طولی تونل در تحلیل‌های بعدی، سطح مقطع نشان داده شده در جدول (۷-۹) مورد بررسی قرار می‌گیرد. منظور از مقاطع مورد بررسی در طول تونل، سطح مقطعی هستند که ابتدا و انتهای هر ساختمان در آن مقطع از طول تونل قرار می‌گیرند.

جدول (۷-۹) : مقاطع مورد بررسی

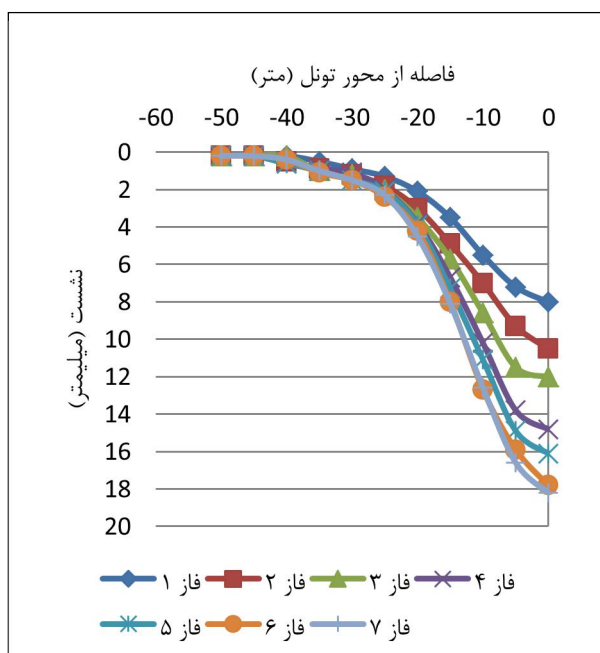
شماره ساختمان	سطح مقطع مورد بررسی (متر)
۳	۴۲ و ۲۱
۴	۴۲ و ۲۱
۵	۶۰ و ۴۵
۶	۶۳ و ۵۴

منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین در مراحل مختلف حفاری تونل، برای حالت سطح آزاد برای سطح مقطع مورد بررسی در شکل (۷-۸) ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود، در تمامی مقاطع میزان نشست در هر فاز بیشتر از فاز قبلی بوده، که دلیل این موضوع را می‌توان ناشی از افزایش ابعاد فضای حفاری در پایان هر فاز، نسبت به فاز قبلی دانست. با توجه به منحنی‌های نشست عرضی

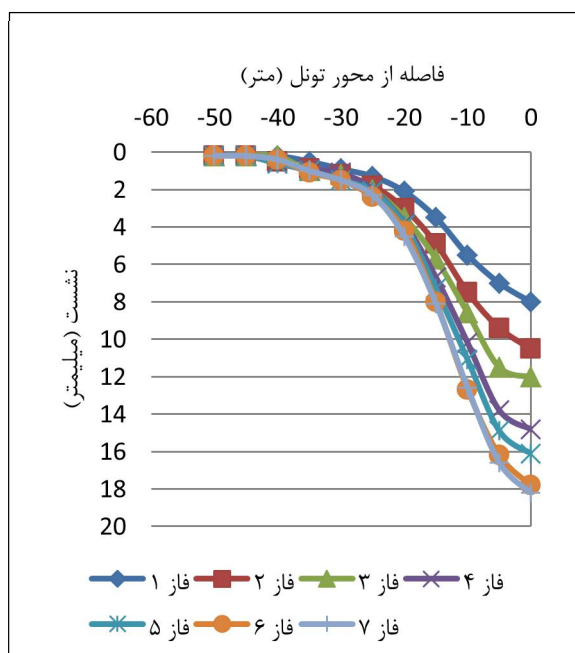
می‌توان فاصله ۴۰ متری از محور مرکزی تونل را به عنوان محدوده تاثیر حفاری تونل در جهت عرضی در سطح زمین در نظر گرفت.



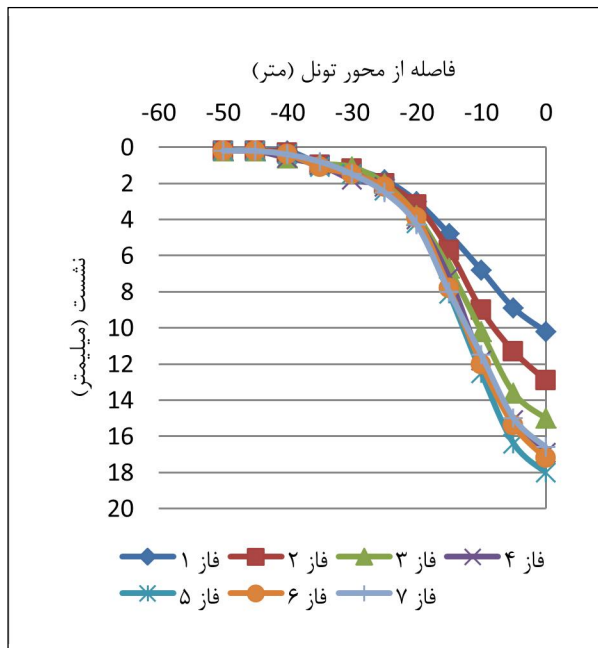
مقطع ۲۱ متری طول تونل



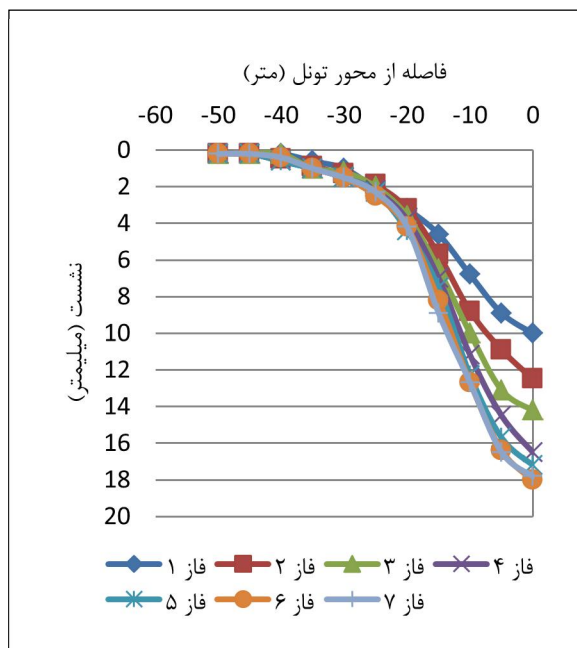
مقطع ۴۲ متری طول تونل



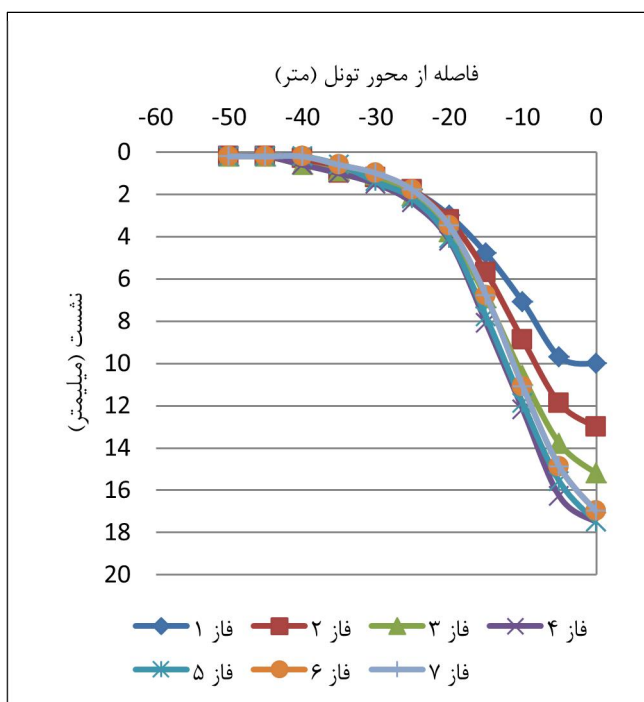
مقطع ۴۵ متری طول تونل



مقطع ۶۰ متری طول تونل



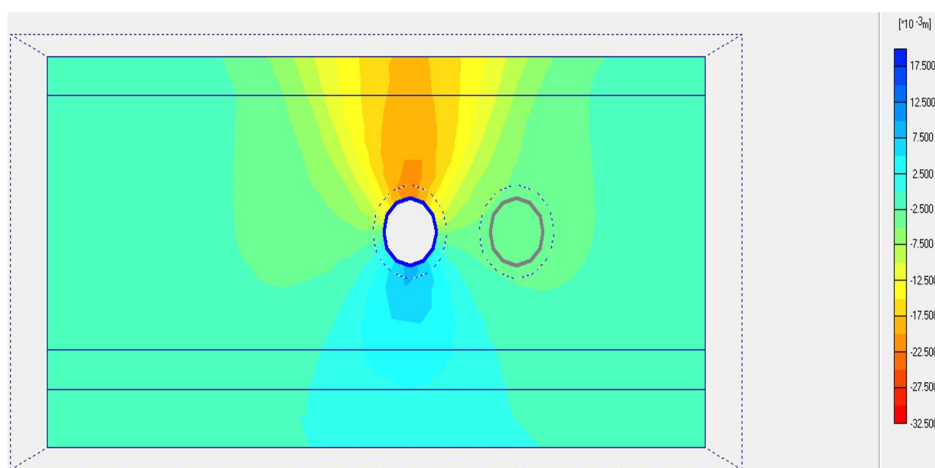
مقطع ۵۴ متری طول تونل



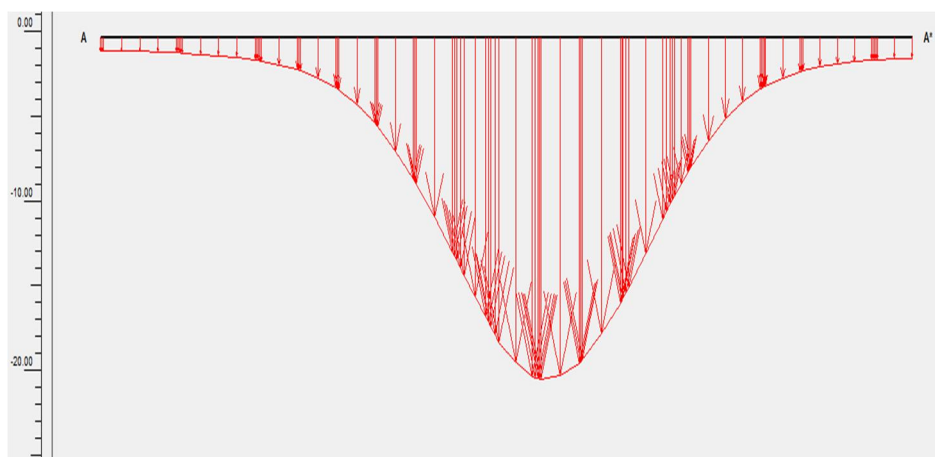
مقطع ۶۳ متری طول تونل

شکل (۷-۸): منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۱ در مراحل مختلف حفاری

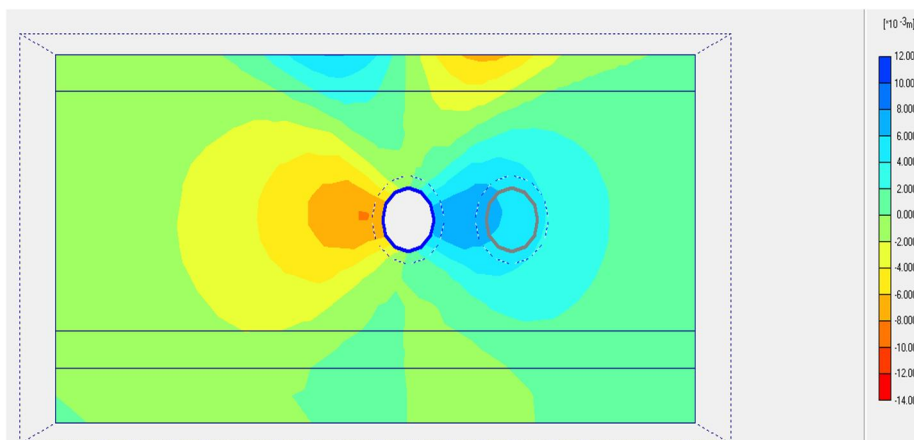
ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول با توجه به شکل (۷-۹) حدود ۲۰ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۱۰) پروفیل نشست سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم نشست حدود ۲۰ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۱۱) کنتور جابجایی افقی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی حدود ۷ میلیمتر می‌باشد و در فاصله ۷ متری از محور تونل اتفاق می‌افتد.



شکل (۷-۹): کنتور جابجایی قائم مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول

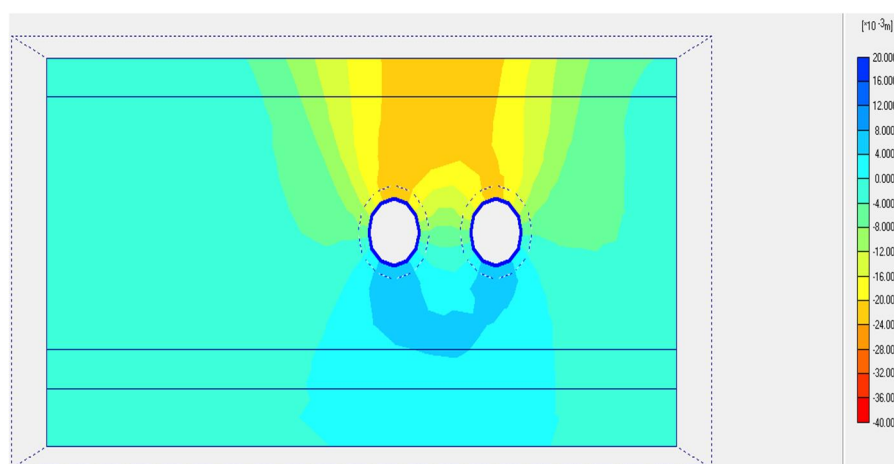


شکل (۷-۱۰): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول

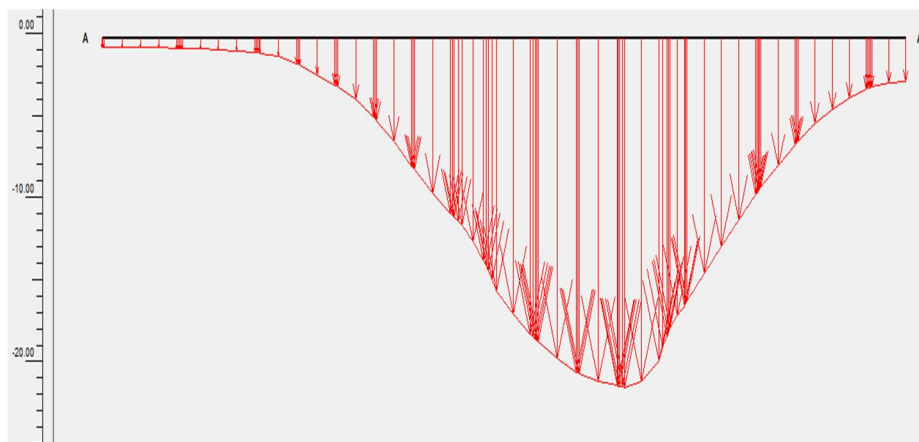


شکل (۷-۱۱) : کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول

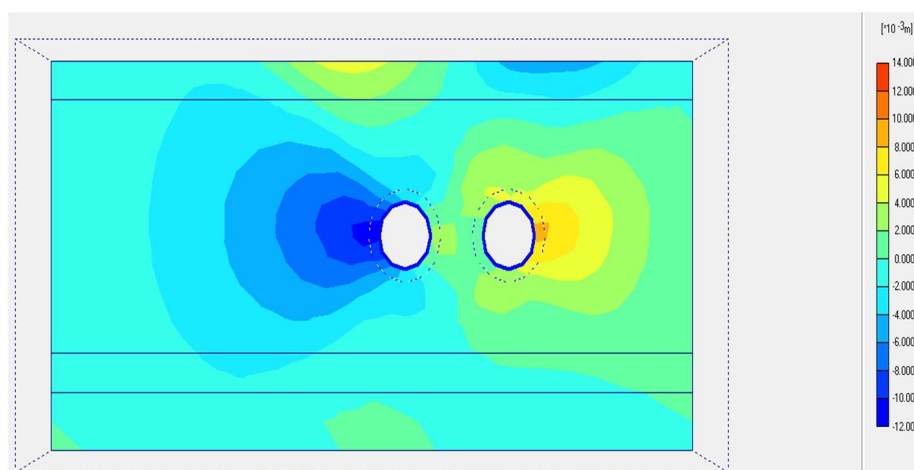
ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل دوم با توجه به شکل (۷-۱۲) حدود ۲۲ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۱۳) پروفیل نشست سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم نشست حدود ۲۲ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۱۴) کنتور جابجایی افقی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی حدود ۷ میلیمتر می‌باشد و در فاصله ۱۰ متری از مرکز دو تونل اتفاق می‌افتد.



شکل (۷-۱۲) : کنتور جابجایی قائم مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم



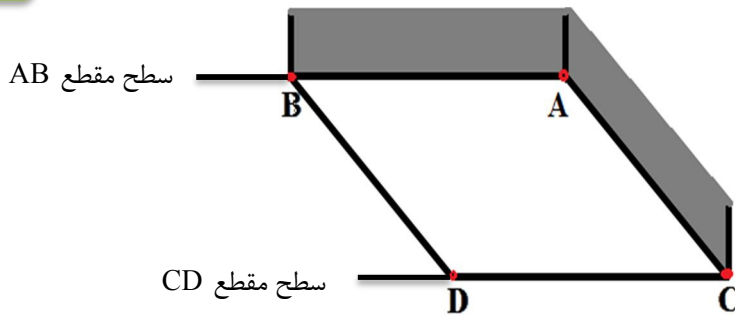
شکل (۷-۱۳): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم



شکل (۷-۱۴): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم

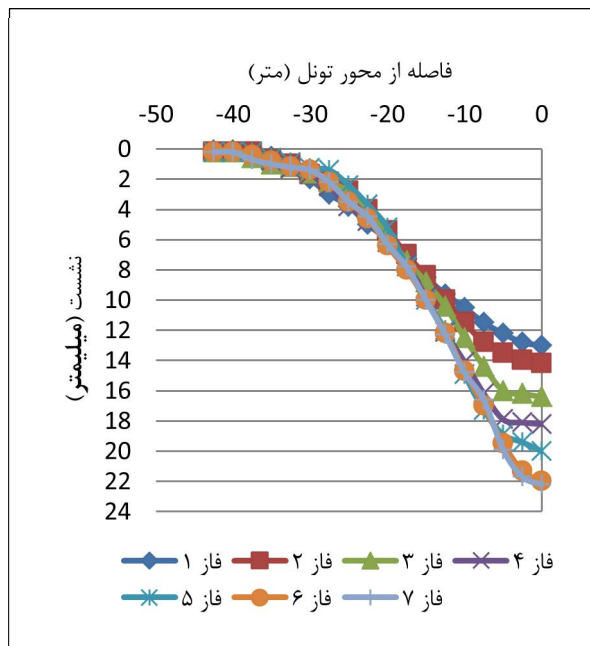
ب: نشست حاصل از حفاری تونل اول با وجود ساختمان

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، ساختمان‌ها در فاصله مشخصی از طول تونل قرار دارند که تحلیل‌ها در این مقاطع صورت می‌گیرد. سطح مقطع ابتدایی هر ساختمان AB و سطح مقطع انتهایی هر ساختمان CD در نظر گرفته می‌شود (شکل (۷-۱۵)).

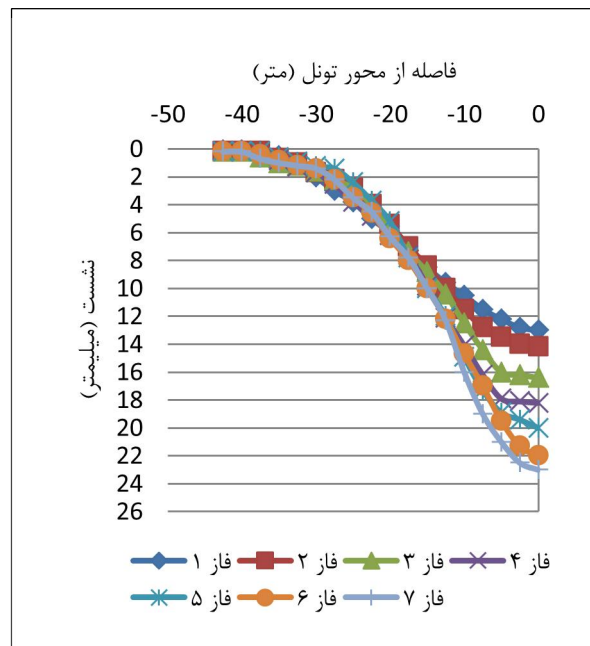


شکل (۷-۱۵): پی ساختمان و سطح مقاطع مورد بررسی

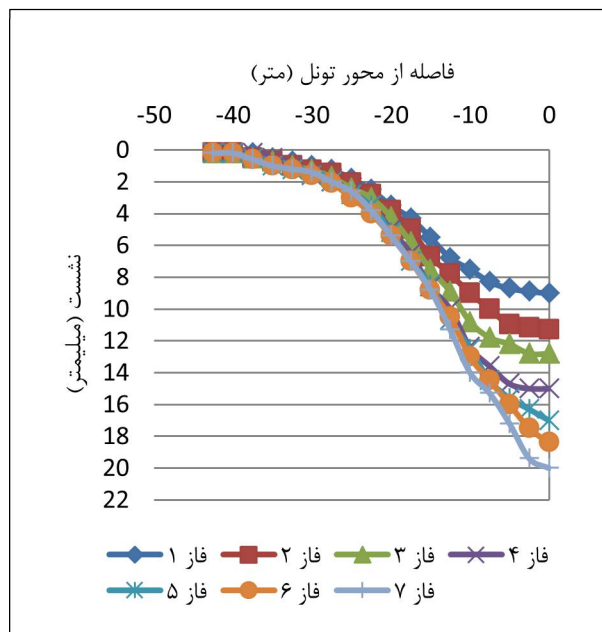
منحنی نشست عرضی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD در مراحل هفت‌گانه حفاری مقطع تونل، پس از حفر تونل اول برای ساختمان‌های مقطع ۱ در شکل (۷-۱۶) نشان داده شده است. مشابه حالت سطح آزاد، نشست در هر فاز بیشتر از فاز قبلی می‌باشد.



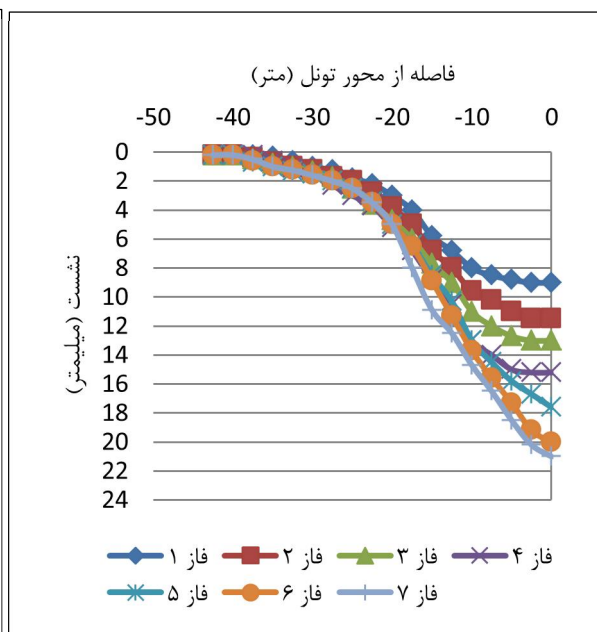
مقطع AB ساختمان ۳ و ۴



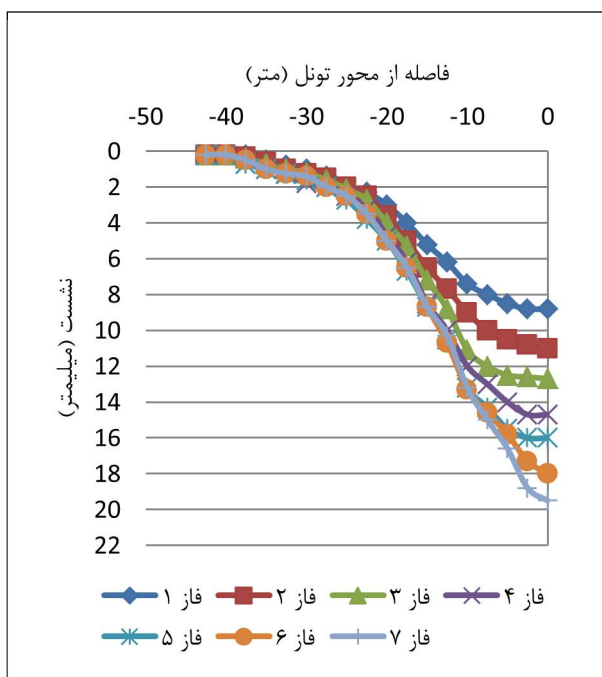
مقطع CD ساختمان ۳ و ۴



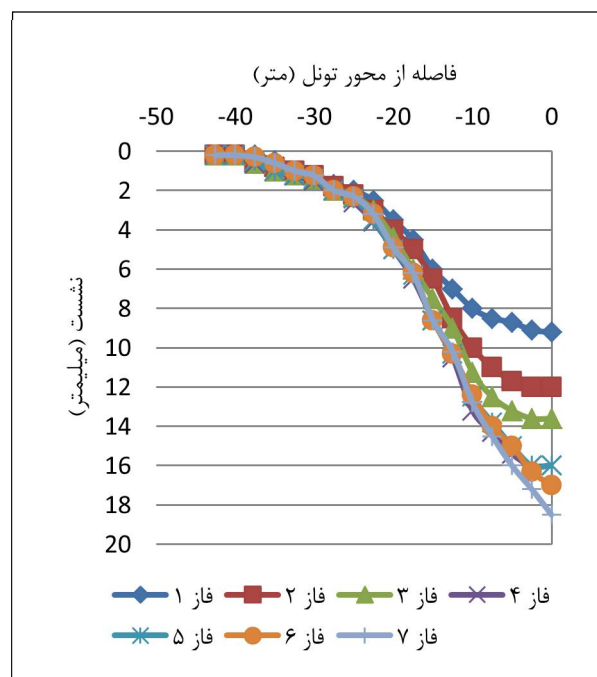
مقطع AB ساختمان ۵



مقطع CD ساختمان ۵



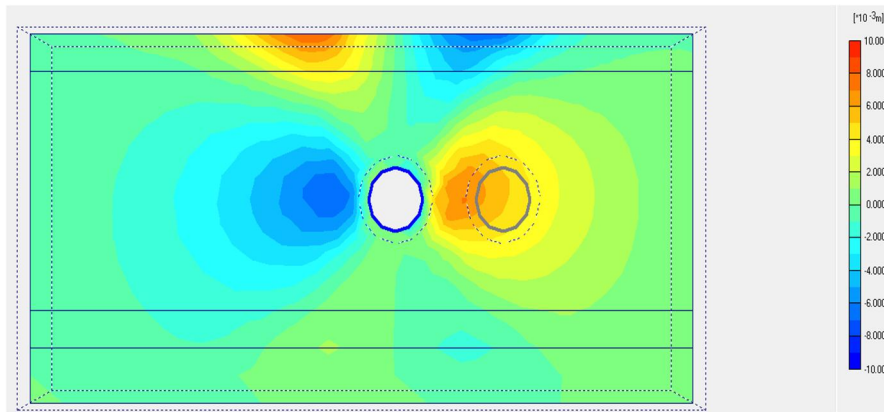
مقطع AB ساختمان ۶



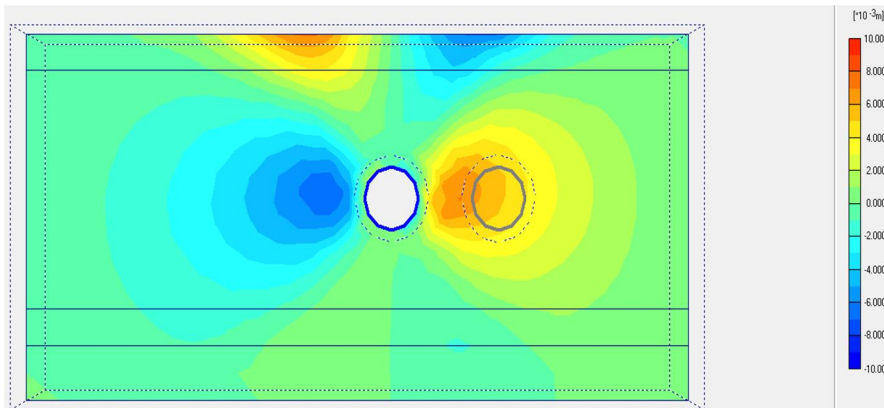
مقطع CD ساختمان ۶

شکل (۷-۱۶): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول

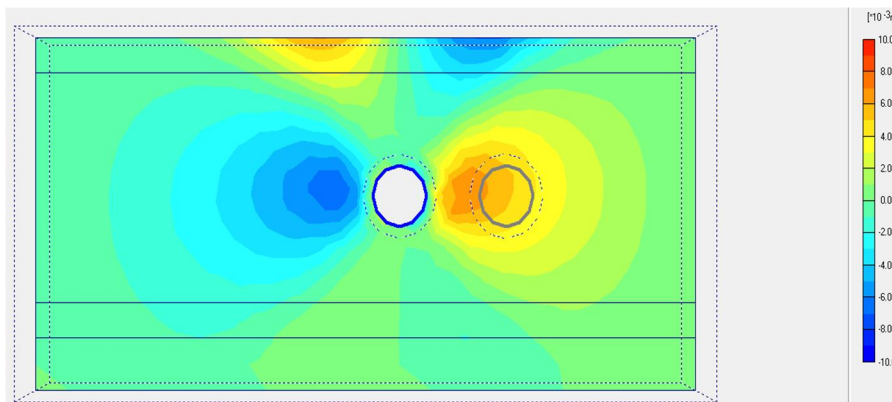
شکل (۷-۱۷) کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD ساختمان‌های مورد مطالعه را بعد از حفر تونل اول نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین در هر سطح مقطع در جدول (۷-۱۰) آورده شده است.



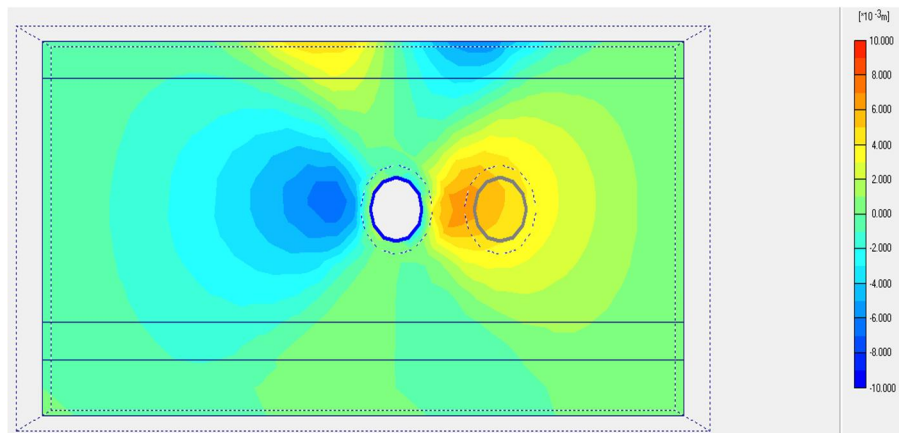
مقطع AB ساختمان ۳ و ۴



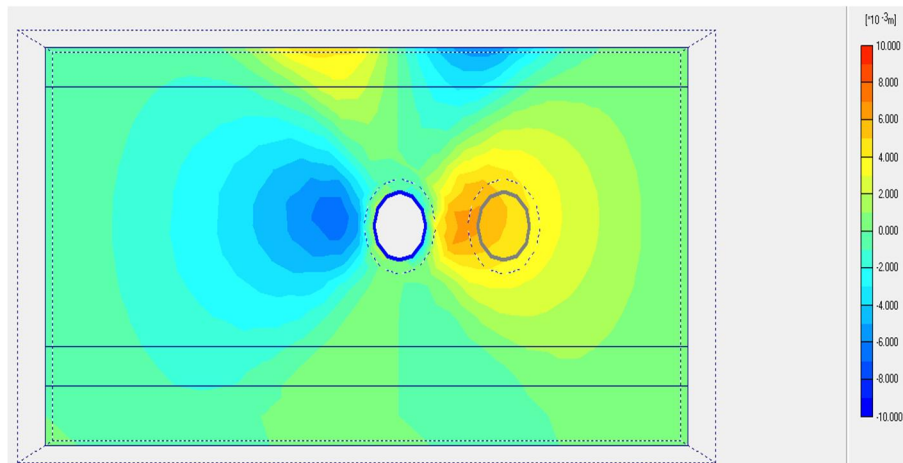
مقطع CD ساختمان ۳ و ۴



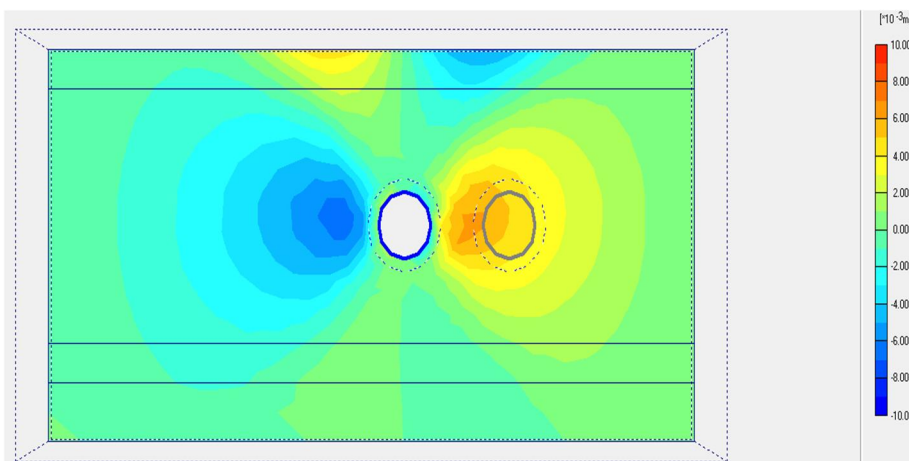
مقطع AB ساختمان ۵



مقطع CD ساختمان ۵



مقطع AB ساختمان ۶



مقطع CD ساختمان ۶

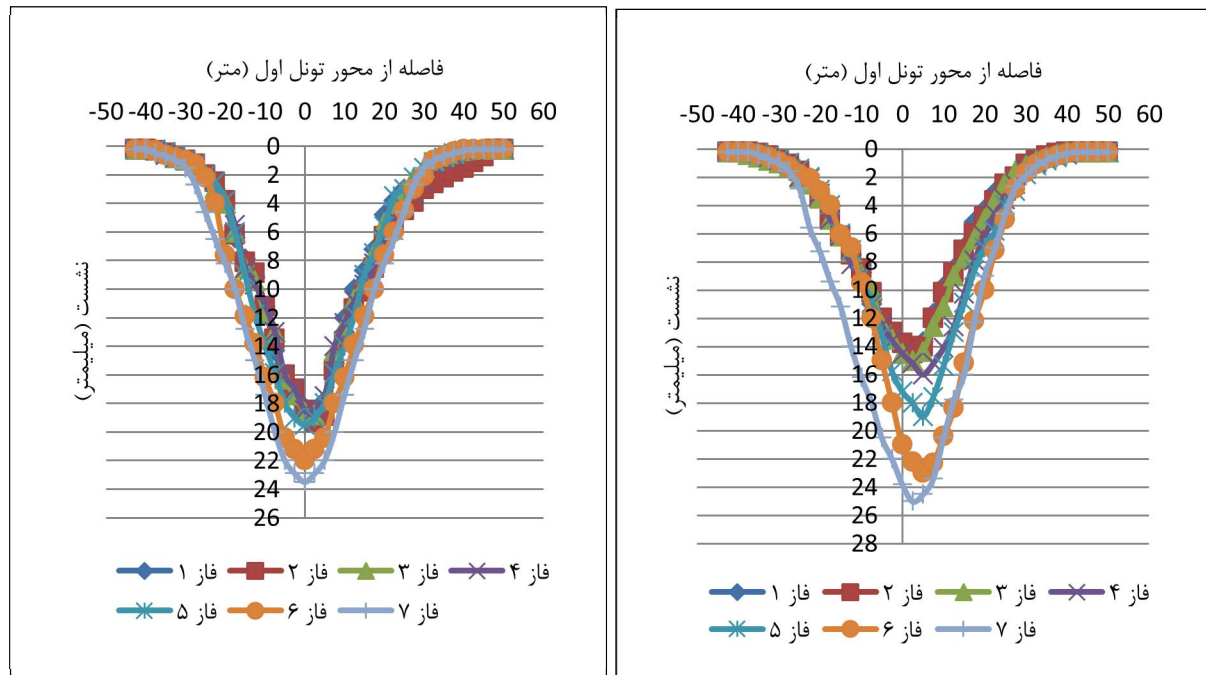
شکل (۷-۱۷): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول

جدول (۷-۱۰): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول

شماره ساختمان	جابجایی افقی سطح مقطع AB (میلیمتر)	جابجایی افقی سطح مقطع CD (میلیمتر)
۳	۶/۷	۶/۱
۴	۶/۷	۶/۱
۵	۶	۴/۵
۶	۵	۴/۲

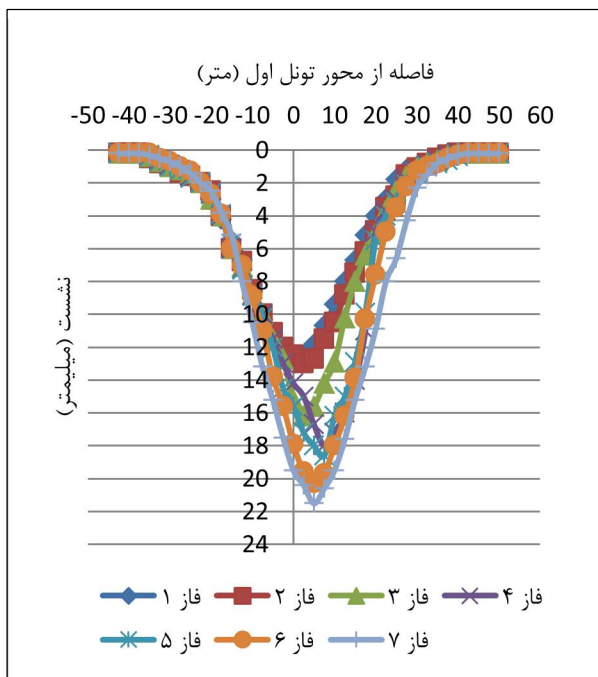
ج: نشست حاصل از حفاری تونل دوم با وجود ساختمان

منحنی نشست عرضی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD در مراحل هفت‌گانه حفاری مقطع تونل، پس از حفر تونل دوم برای ساختمان‌های مقطع ۱ در شکل (۷-۱۸) نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌ها، در تمامی مقاطع در همه فازها منحنی نشست به سمت تونل دوم متمایل شده و نشست در فازهای مختلف حفاری خیلی نزدیک به هم می‌باشد.

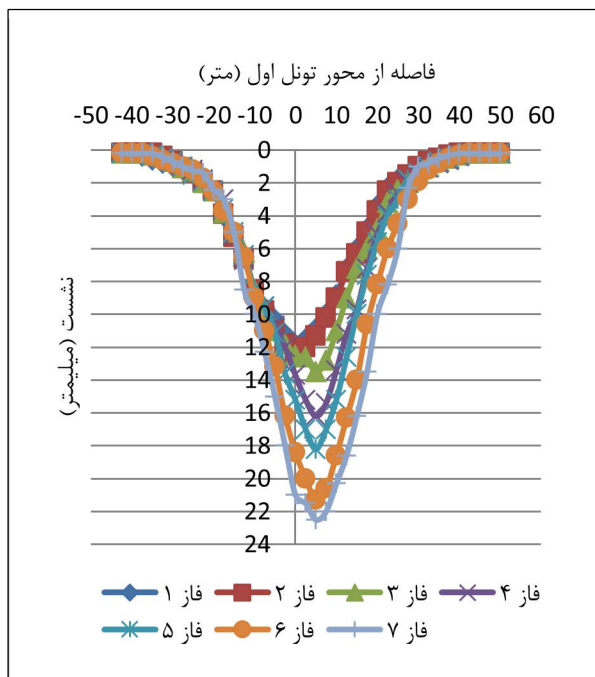


مقطع AB ساختمان ۳ و ۴

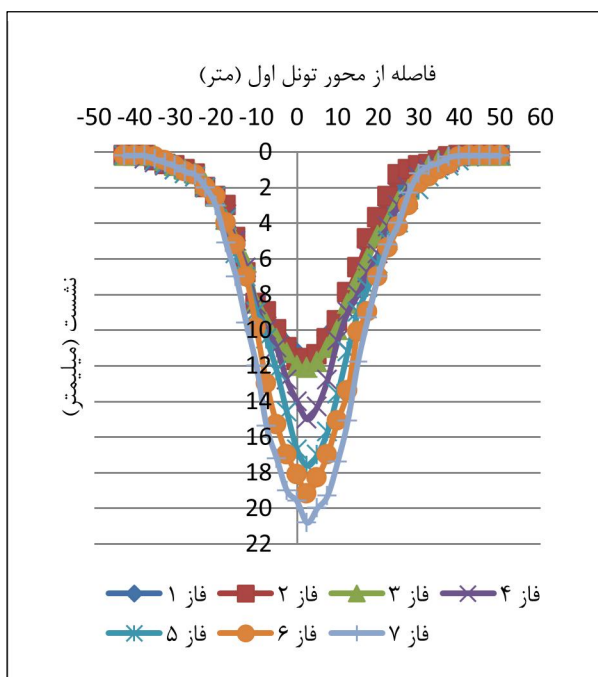
مقطع CD ساختمان ۳ و ۴



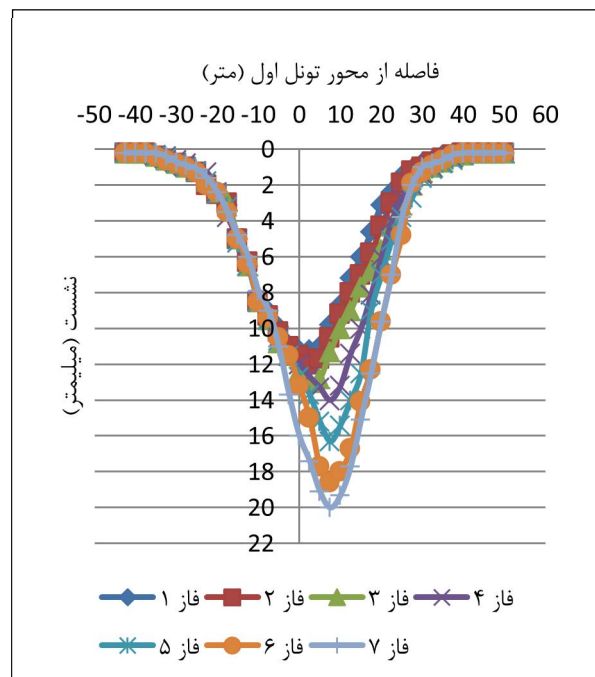
مقطع AB ساختمان ۵



مقطع CD ساختمان ۵



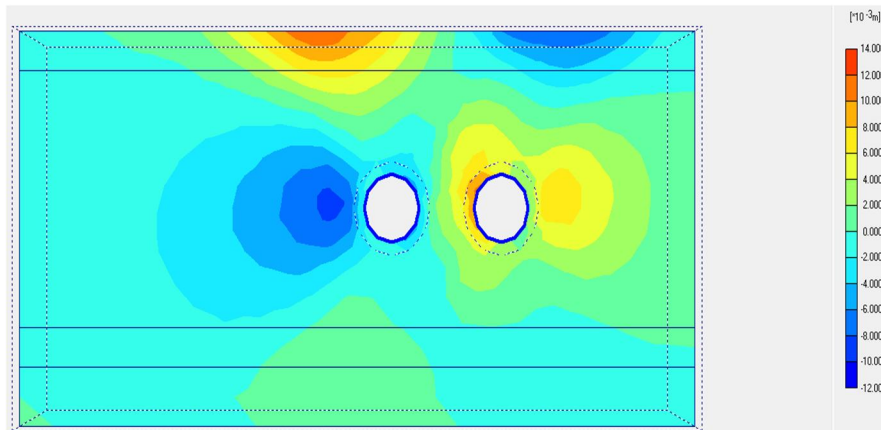
مقطع AB ساختمان ۶



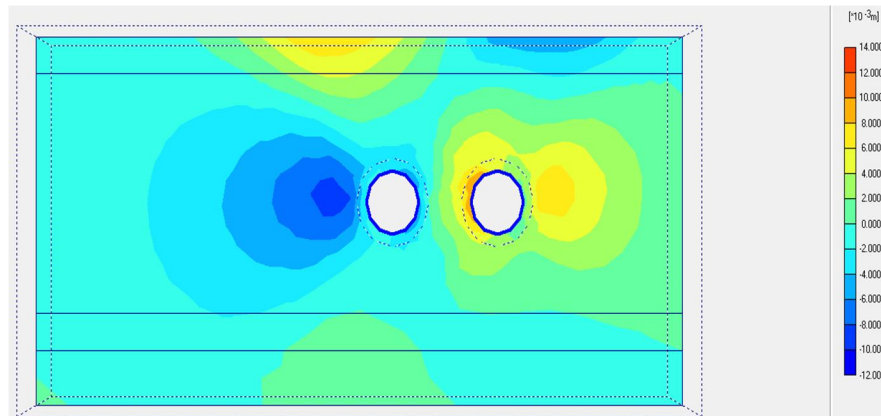
مقطع CD ساختمان ۶

شکل (۷-۱۸): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل

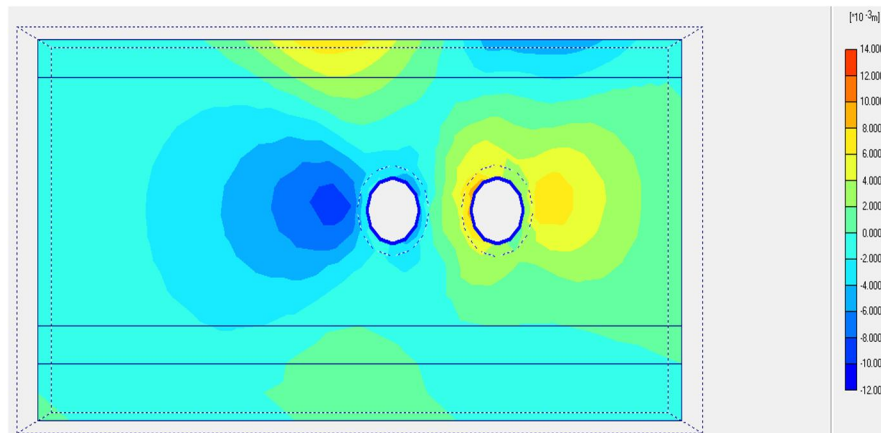
شکل (۷-۱۹) کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD ساختمان‌های مورد مطالعه را بعد از حفر تونل دوم نشان می‌دهد که میزان جابجایی افقی هر مقطع در جدول (۷-۱۱) آورده شده است.



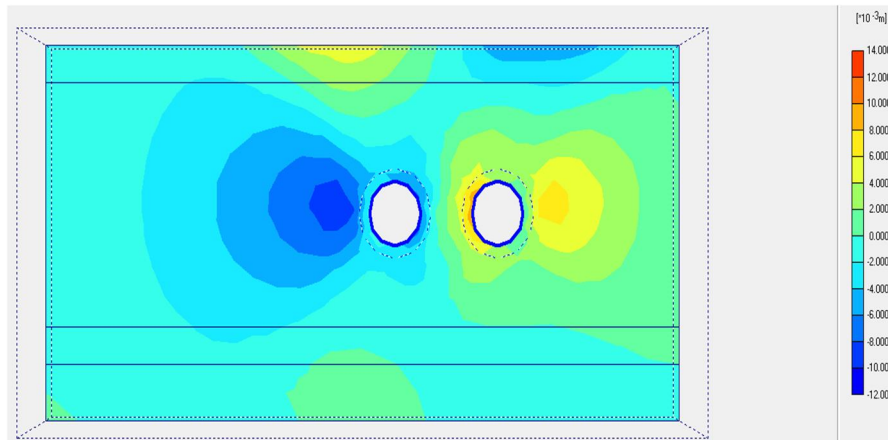
مقطع AB ساختمان ۳ و ۴



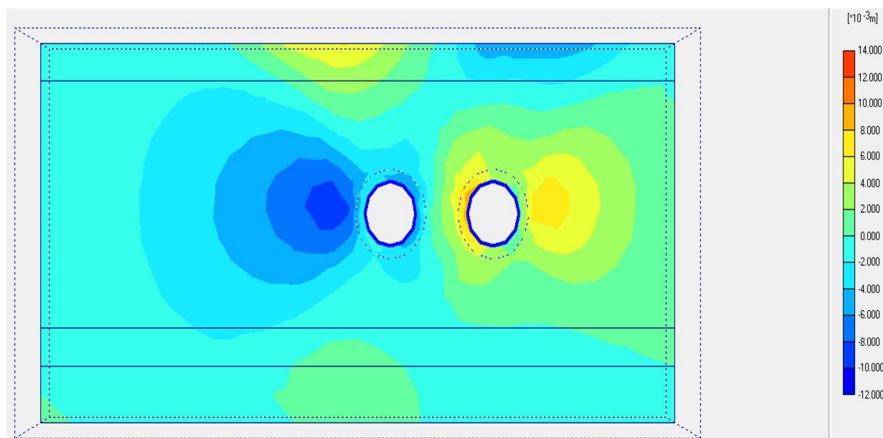
مقطع CD ساختمان ۳ و ۴



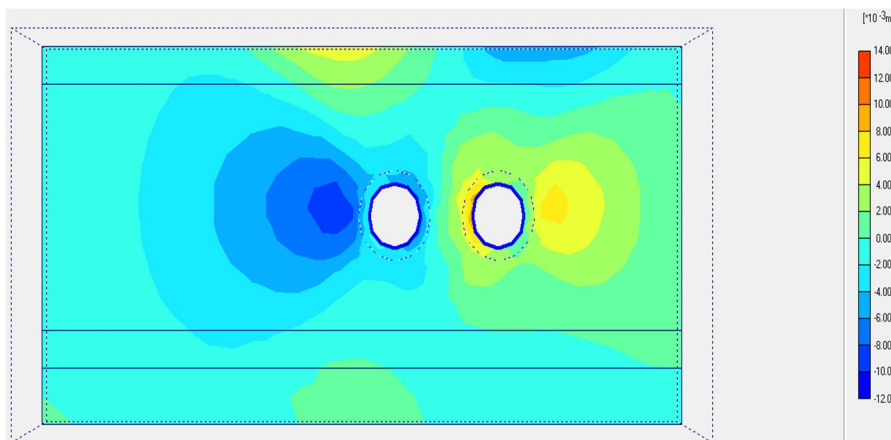
مقطع AB ساختمان ۵



مقطع CD ساختمان ۵



مقطع AB ساختمان ۶



مقطع CD ساختمان ۶

شکل (۷-۱۹): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم

جدول (۷-۱۱): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم

شماره ساختمان	جابجایی افقی سطح مقطع AB (میلیمتر)	جابجایی افقی سطح مقطع CD (میلیمتر)
۳	۱۰	۷
۴	۱۰	۷
۵	۶/۵	۵/۳
۶	۶	۵/۱

د: ارزیابی نتایج نشست ساختمان‌های مقطع ۱

میزان نشست در نقاط تعیین شده زیر پی ساختمان‌ها پس از حفاری تونل اول و تونل دوم در فازهای مختلف حفاری در جدول (۷-۱۲) آورده شده است. نشست در پی ساختمان‌ها از منحنی نشست سطح زمین تبعیت نموده و با توجه به نتایج بدست آمده، در تمامی ساختمان‌ها در همه فازها بیشترین نشست زیر پی در نقاطی رخ می‌دهد که نزدیک محور تونل و حداقل نشست در نقاطی اتفاق می‌افتد که در فاصله دورتری نسبت به محور تونل قرار دارند. همان‌گونه که از نتایج بر می‌آید، بحرانی‌ترین نقطه در زیر پی ساختمان‌های مقطع ۱ از نظر حداکثر جابجایی‌های عمودی، نقطه A می‌باشد.

جدول (۷-۱۲): مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۱ (میلیمتر)

ساختمان شماره ۳								
پس از حفاری تونل دوم				پس از حفاری تونل اول				
D	C	B	A	D	C	B	A	
۴/۱۳	۴/۲۴	۶/۳۲	۶/۵۷	۰/۱۳۰	۰/۱۲۳	۰/۱۸۶	۰/۱۷۹	فاز ۱
۴/۲۳	۴/۵۶	۷/۷۲	۸/۶۲	۰/۱۹۲	۰/۱۸۰	۰/۳۰۰	۰/۲۵۰	فاز ۲
۵/۳۲	۶/۵۴	۸/۲۳	۹/۴۶	۰/۲۱۹	۰/۲۲۳	۰/۵	۰/۴۵۲	فاز ۳
۵/۹۷	۷/۲۱	۹/۱۲	۱۰/۶۹	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۹۲	۰/۸۵۴	فاز ۴
۶/۶۵	۸/۸۶	۱۰/۹۴	۱۲/۲۱	۰/۸۲	۰/۸۳۷	۱/۵۵	۱/۲۳	فاز ۵
۸/۲۴	۱۰/۰۲	۱۱/۵۳	۱۳/۶۳	۱/۰۶	۱/۱۲	۳	۲/۷۴	فاز ۶

ادامه جدول (۷-۱۲)

۱۰/۶۹	۱۱/۵۲	۱۳/۲۱	۱۴/۰۸	۲/۹۱	۲/۹۶	۳/۶۷	۳/۵۳	فاز ۷
۱۲/۸۵	۱۳/۰۴	۱۴/۹۸	۱۵/۲۶	۳/۸۲	۳/۸۴	۵/۳۰	۵/۲۶	نهایی
ساختمان شماره ۴								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۰/۸۵۳	۰/۹۱۰	۰/۹۷۶	۱/۱۲	۰/۰۸۷	۰/۰۹۵	۰/۱۱۲	۰/۱۲۱	فاز ۱
۰/۹۰۵	۰/۹۸	۱/۱۵۱	۱/۸۹	۰/۱۱۴	۰/۱۲۱	۰/۱۶۰	۰/۱۸۹	فاز ۲
۱/۴۰	۱/۴۲	۲	۲/۲۰	۰/۱۵۲	۰/۱۴۸	۰/۲۰۵	۰/۲۲۰	فاز ۳
۲/۱۰	۲/۱۵	۲/۵۰	۲/۷۴	۰/۲	۰/۲۰۱	۰/۲۸۵	۰/۳۱۰	فاز ۴
۲/۰۴	۲/۰۷	۲/۹۵	۳/۱۲	۰/۳۵۲	۰/۳۹۵	۰/۴۱۰	۰/۴۶۸	فاز ۵
۲/۴۳	۲/۵۲	۳/۱۶	۳/۲۳	۰/۴۰۰	۰/۴۰۹	۰/۴۶۷	۰/۵۰۴	فاز ۶
۲/۷۲	۲/۸۴	۳/۲۱	۳/۶۲	۰/۵۱۵	۰/۵۳۸	۰/۵۹۱	۰/۶۴۳	فاز ۷
۳/۵۲	۳/۴۶	۴/۲۱	۴/۵۳	۰/۷۰۰	۰/۷۰۲	۰/۷۸۸	۰/۸۲۰	نهایی
ساختمان شماره ۵								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۵/۲۰	۴/۴۲۷	۵/۸۱۲	۵/۲۳۲	۰/۱۴۶	۰/۱۴۰	۰/۲۱۰	۰/۱۸۱	فاز ۱
۵/۷۱	۵/۷۲	۶/۵۵	۶/۶۴۲	۰/۲۰۳	۰/۱۹۶	۰/۳۷	۰/۲۹۸	فاز ۲
۶/۱۹	۶/۴۲	۷/۲۳	۷/۷۲	۰/۳۱۶	۰/۲۶۷	۰/۴۷۹	۰/۴۰۸	فاز ۳
۷/۲۶	۷/۹۶	۸/۸۶	۹/۲۵	۰/۵۳۸	۰/۵۰۳	۰/۷۱۷	۰/۶۵۲	فاز ۴
۸/۷۸	۹/۱۴	۱۰/۰۲	۱۰/۳۲	۰/۹۰۱	۰/۸۱۶	۱/۱۶۳	۰/۹۰۸	فاز ۵
۱۰/۰۱	۱۰/۲۳	۱۱/۲۰	۱۱/۴۹	۱/۱۶۰	۱/۱۴۳	۲/۸۹۳	۲/۲۶۰	فاز ۶
۱۰/۸۱	۱۱/۵۳	۱۲/۰۹	۱۲/۵۶	۳/۰۱۰	۲/۵۶۹	۳/۵۰	۳/۲۴۱	فاز ۷
۱۲/۰۲	۱۲/۲۶	۱۲/۴۹	۱۳/۶۴	۴/۹۱	۳/۶۹۱	۴/۵۱	۴/۳	نهایی
ساختمان شماره ۶								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۳/۰۲	۳/۳۱	۳/۹۶	۴/۲۱	۰/۱۴۲	۰/۱۵۰	۰/۱۷۶	۰/۱۹۸	فاز ۱
۳/۳۵	۳/۹۴	۴/۴۲	۴/۷۸	۰/۲۵۰	۰/۲۵۶	۰/۳۰۲	۰/۳۸۵	فاز ۲
۴/۲۱	۴/۵۹	۵/۰۶	۵/۳۵	۰/۳۵۶	۰/۳۹۲	۰/۴۶۹	۰/۵۱۲	فاز ۳
۵/۰۷	۵/۵۰	۵/۶۷	۶/۰۰	۰/۶۶۳	۰/۶۷۹	۰/۷۸۲	۰/۸۲۹	فاز ۴

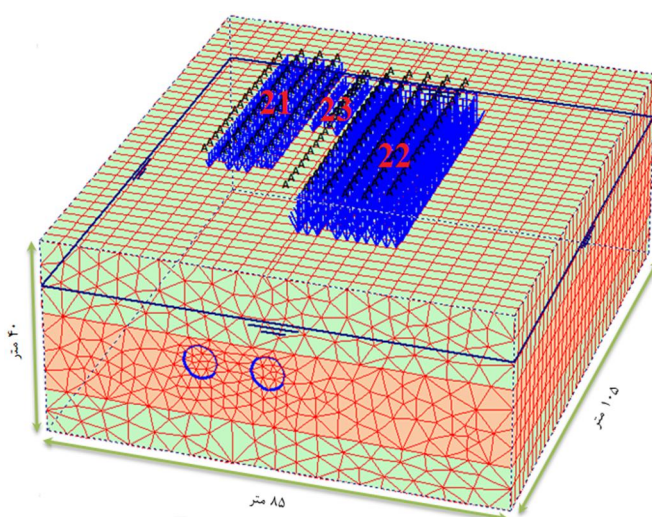
ادامه جدول (۷-۱۲)

۵/۵۱	۵/۹۴	۶/۲۶	۶/۶۸	۰/۷۰۱	۰/۷۵۱	۰/۸۶۱	۰/۹۲۰	فاز ۵
۶/۲۲	۶/۶۱	۷/۰۴	۷/۵۱	۰/۹۰	۰/۹۶	۱/۲۴	۱/۵۶	فاز ۶
۷/۰۸	۷/۱۶	۷/۷۸	۸/۴۵	۱/۳۴	۱/۶۷	۲/۰۹	۲/۲۲	فاز ۷
۷/۱۰	۸/۲۰	۸/۵۴	۹/۱۳	۲/۵۱	۲/۷۱	۳/۱۳	۳/۵۰	نهایی

فاز نهایی منظور هنگامی است که آخرین رینگ گذاری به اندازه ۳ برابر قطر تونل از مقطع CD آخرین ساختمان عبور کرده باشد، که نشست‌ها تقریباً به یک حالت ایستا رسیده است.

۷-۲-۳-۳ تحلیل نشست ساختمان‌های مقطع ۲

طول، عرض و ارتفاع هندسه مدل برای این مقطع به ترتیب ۱۰۵ متر، ۸۵ متر و ۴۰ متر و نوع مش‌بندی متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر یک از تونل‌ها با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، ۳۵ فاز حفاری در نظر گرفته شده که در مجموع برای کل مدل ۷۰ فاز حفاری تا انتهای مدل صورت گرفته است. شکل (۷-۲۰) موقعیت ساختمان‌های مقطع شماره ۲ را نشان می‌دهد. مشخصات هندسی مدل ساخته شده و همچنین ضخامت پی ساختمان‌ها و تاثیر بار هر یک از ساختمان‌ها در مسیر حفاری برای مقطع ۲ به ترتیب در جدول (۷-۱۳) و (۷-۱۴) آورده شده است.



شکل (۷-۲۰): مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۲

جدول (۷-۱۳): مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۲

شماره مقطع	روباره (متر)	عمق کف تونل (متر)	عرض مدل (متر)	ارتفاع مدل (متر)	طول مدل (متر)	تعداد المان‌ها
۲	۱۶/۳	۲۳/۱۸	۸۵	۴۰	۱۰۵	۶۴۴۷

جدول (۷-۱۴): مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۲

شماره ساختمان	بار گسترده (KN)	ضخامت پی (m)
۲۱	۲۰	۰/۵
۲۲	۵۰	۲
۲۳	۲۰	۰/۵

الف: تحلیل نشست در حالت سطح آزاد

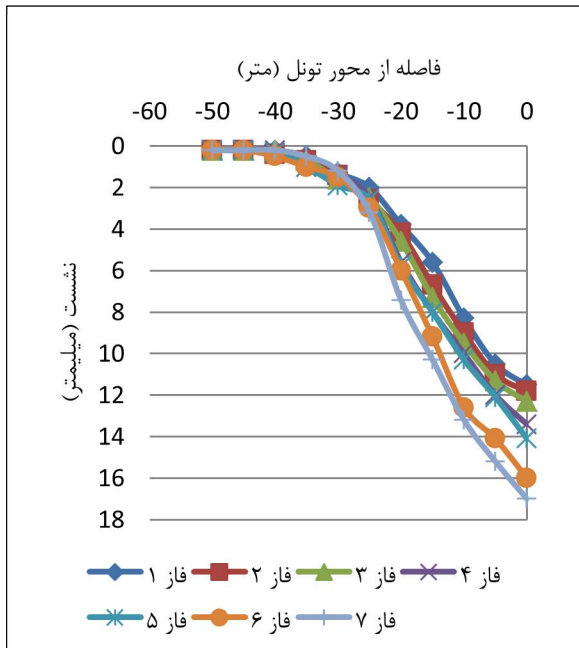
در این بخش از تحلیل‌ها، نشست سطح زمین در حالت بدون وجود ساختمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور با توجه به موقعیت قرارگیری ساختمان‌ها در راستای طولی تونل در تحلیل‌های بعدی، سطح مقطع نشان داده شده در جدول (۷-۱۵) مورد بررسی قرار می‌گیرد. منظور از مقاطع مورد بررسی در طول تونل، سطح مقطعی هستند که ابتدا و انتهای هر ساختمان در آن مقطع از طول تونل قرار می‌گیرند.

جدول (۷-۱۵): مقاطع مورد بررسی

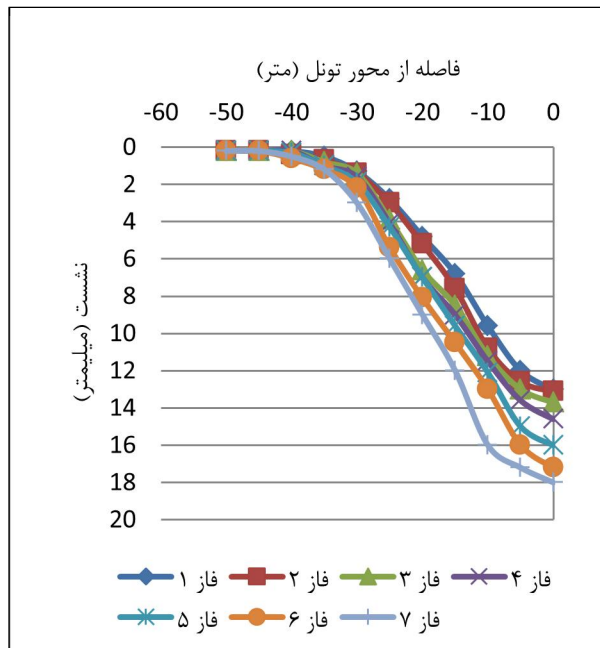
شماره ساختمان	سطح مقطع مورد بررسی (متر)
۲۱	۷۲ و ۴۲
۲۲	۳۶ و ۲۱
۲۳	۵۷ و ۴۵

منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین در مراحل مختلف حفاری تونل، برای حالت سطح آزاد برای سطح مقطع مورد بررسی در شکل (۷-۲۱) ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود، همانند مقطع ۱ در تمامی مقاطع میزان نشست در هر فاز بیشتر از فاز قبلی بوده، که دلیل این موضوع را می‌توان

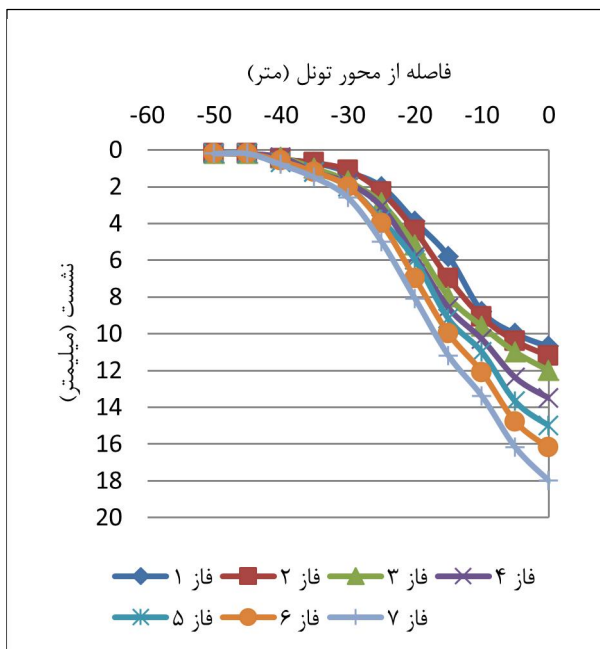
ناشی از افزایش ابعاد فضای حفاری در پایان هر فاز، نسبت به فاز قبلی دانست. با توجه به منحنی‌های نشست عرضی می‌توان فاصله ۴۰ متری از محور مرکزی تونل را به عنوان محدوده تاثیر حفاری تونل در جهت عرضی در سطح زمین در نظر گرفت.



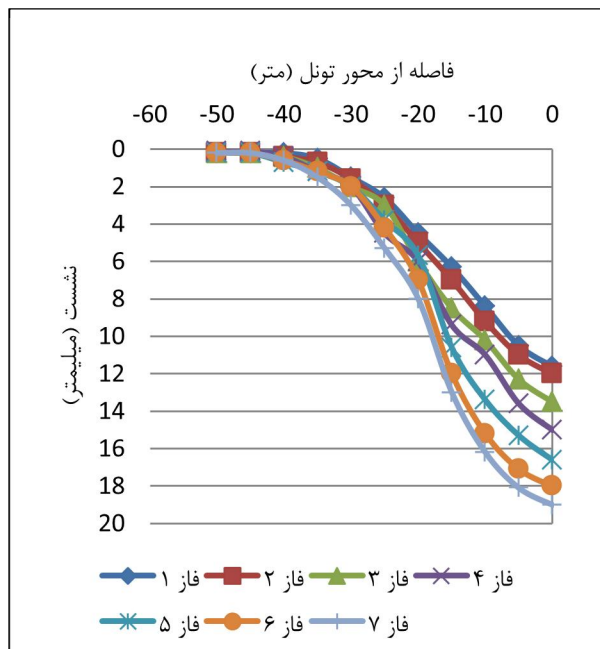
مقطع ۷۲ متری طول تونل



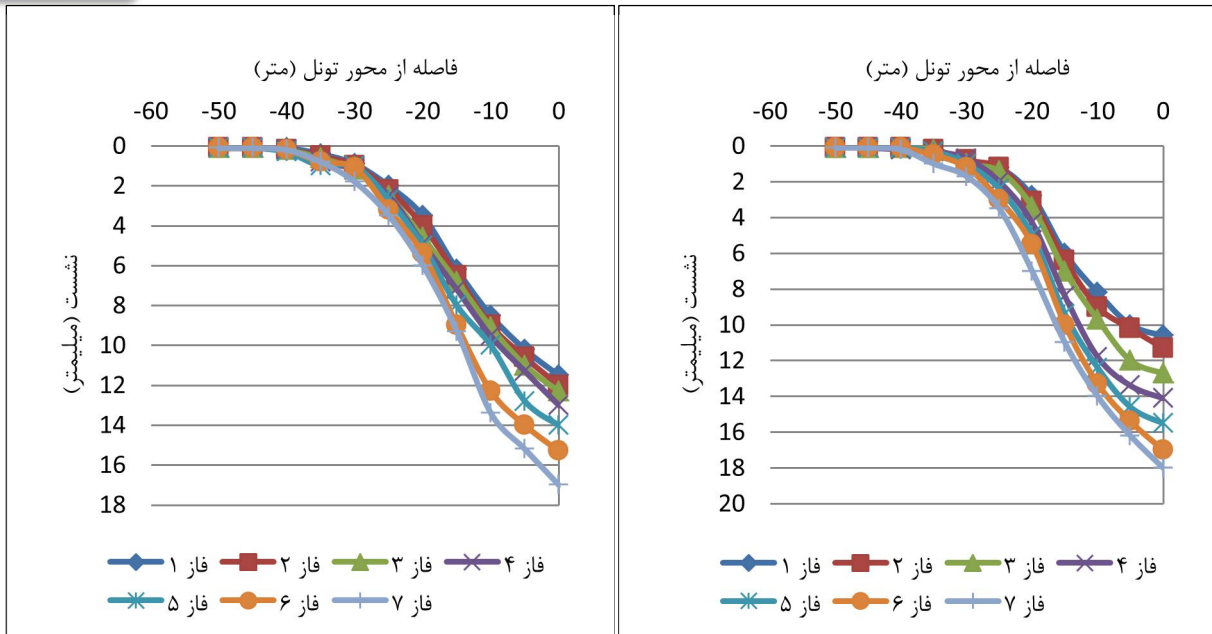
مقطع ۴۲ متری طول تونل



مقطع ۳۶ متری طول تونل



مقطع ۲۱ متری طول تونل

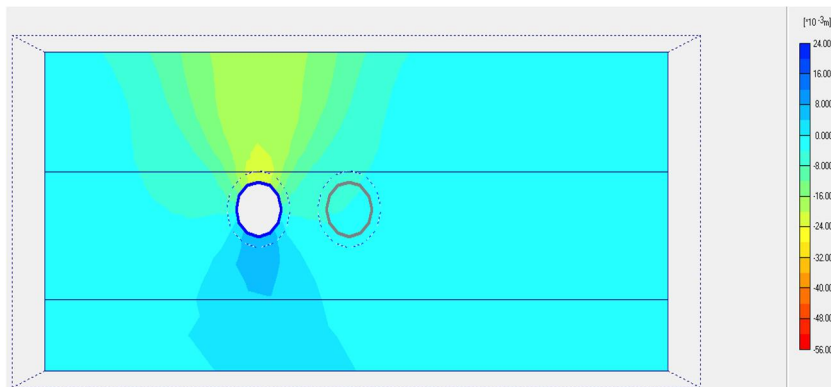


مقطع ۵۷ متری طول تونل

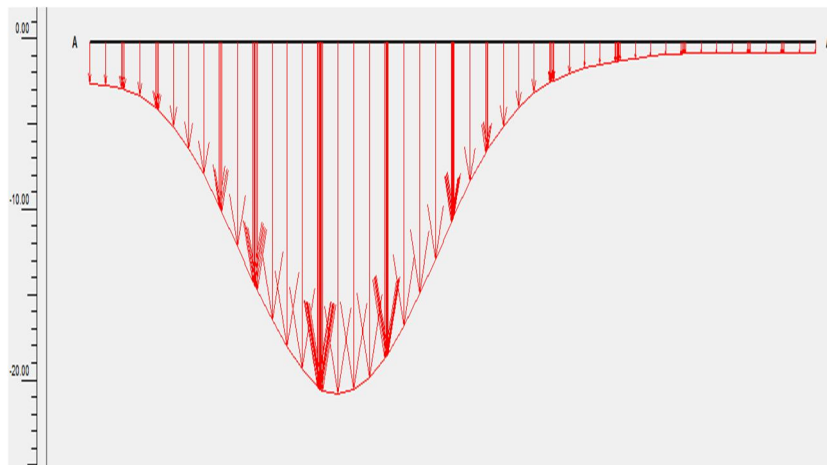
مقطع ۴۵ متری طول تونل

شکل (۷-۲۱): منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۲ در مراحل مختلف حفاری

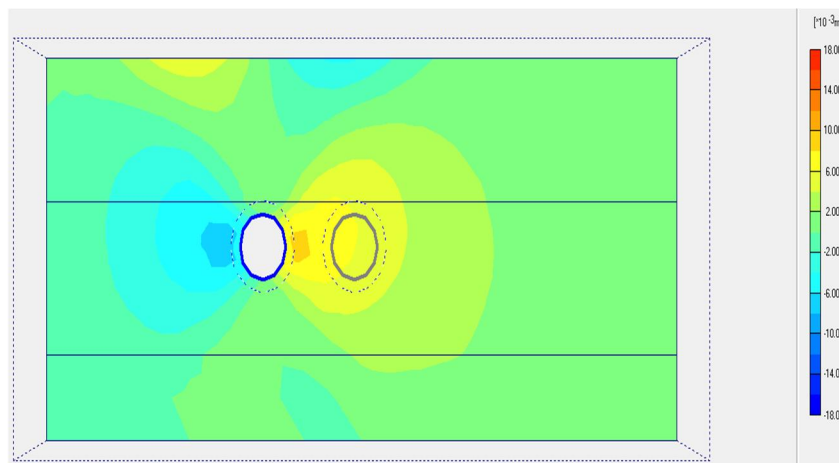
ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول با توجه به شکل (۷-۲۲) حدود ۲۰ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۲۳) پروفیل نشست سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم نشست حدود ۲۰ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۲۴) کنتور جابجایی افقی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی حدود ۶ میلیمتر می‌باشد و در فاصله ۸ متری از محور تونل اتفاق می‌افتد.



شکل (۷-۲۲): کنتور جابجایی قائم مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول

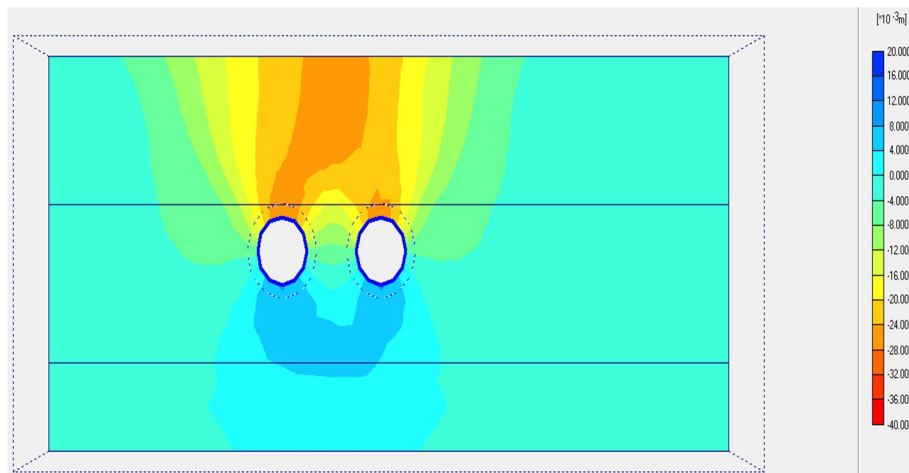


شکل (۷-۲۳): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول

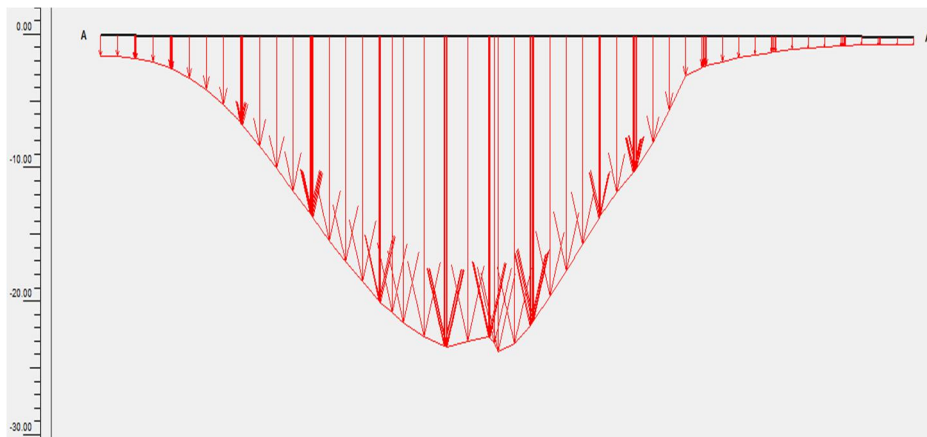


شکل (۷-۲۴): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول

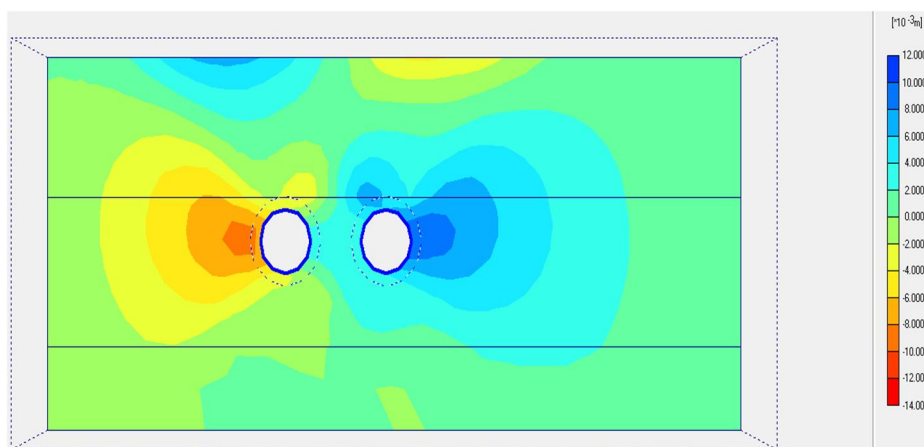
ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل دوم با توجه به شکل (۷-۲۵) حدود ۲۶ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۲۶) پروفیل نشست سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم نشست حدود ۲۶ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۲۷) کنتور جابجایی افقی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی حدود ۷ میلیمتر می‌باشد و در فاصله ۱۲ متری از مرکز دو تونل اتفاق می‌افتد.



شکل (۷-۲۵): کنتور جابجایی قائم مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم



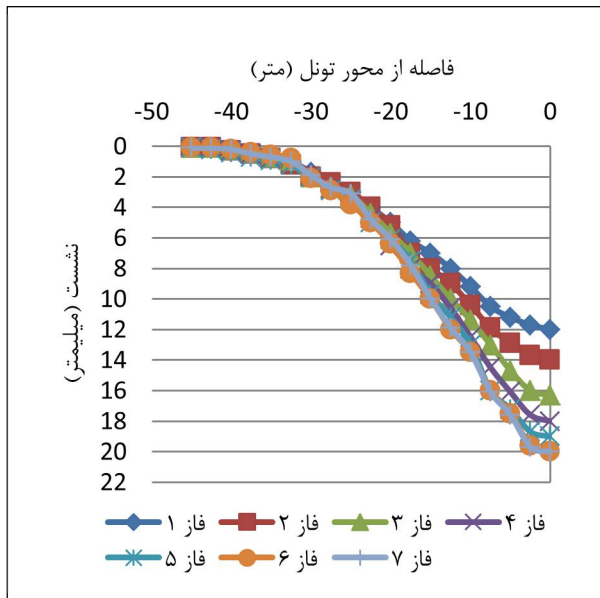
شکل (۷-۲۶): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم



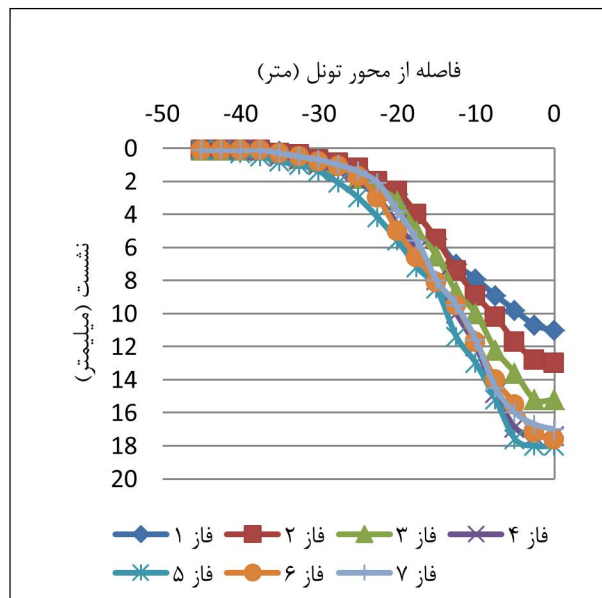
شکل (۷-۲۷): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم

ب: نشست حاصل از حفاری تونل اول با وجود ساختمان

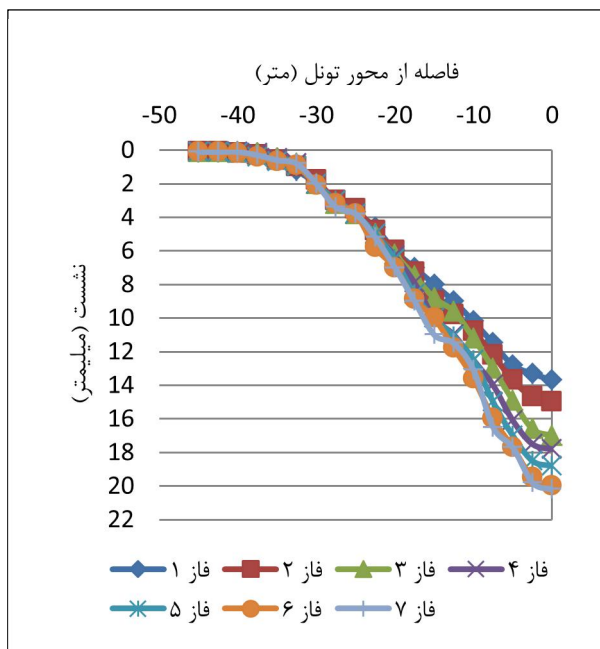
منحنی نشست عرضی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD در مراحل هفت گانه حفاری مقطع تونل، پس از حفر تونل اول برای ساختمان‌های مقطع ۲ در شکل (۷-۲۸) نشان داده شده است. مشابه حالت سطح آزاد، نشست در هر فاز بیشتر از فاز قبلی می‌باشد.



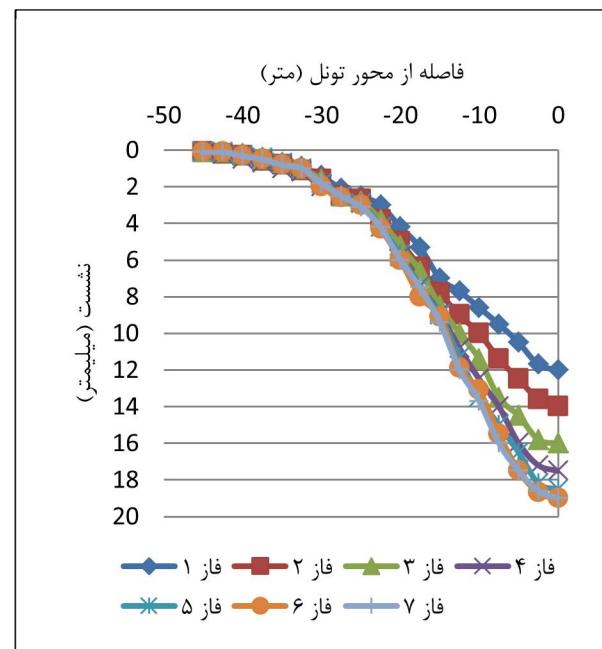
مقطع AB ساختمان ۲۱



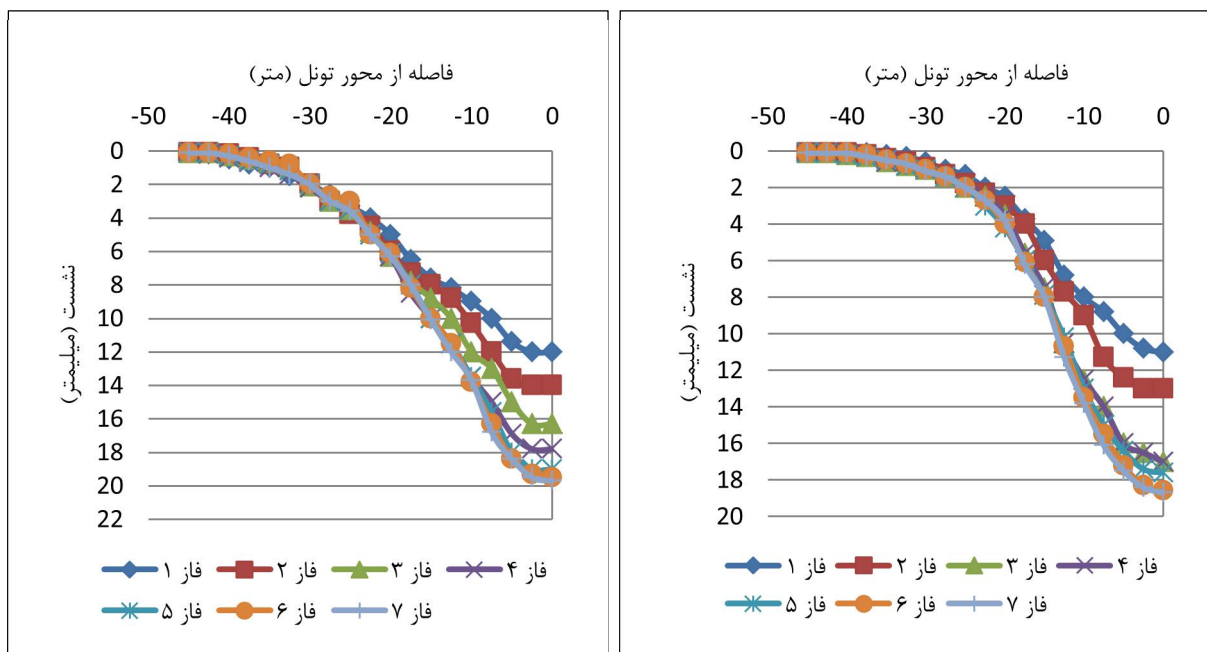
مقطع CD ساختمان ۲۱



مقطع AB ساختمان ۲۲



مقطع CD ساختمان ۲۲



مقطع AB ساختمان ۲۳

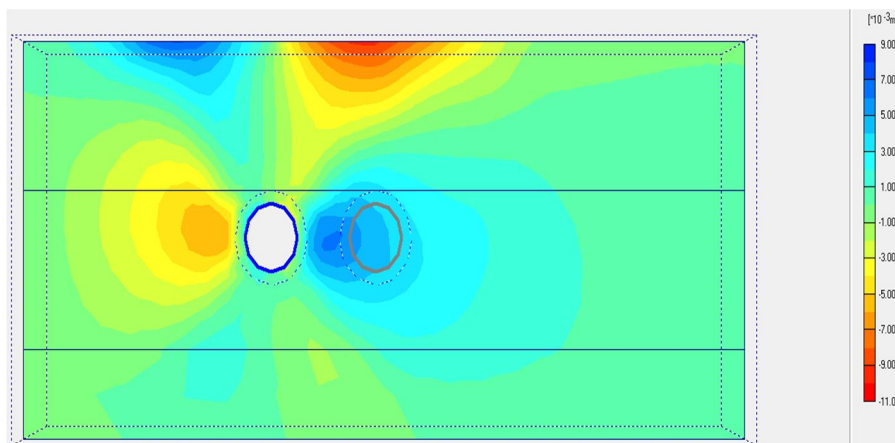
مقطع CD ساختمان ۲۳

شکل (۷-۲۸): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول

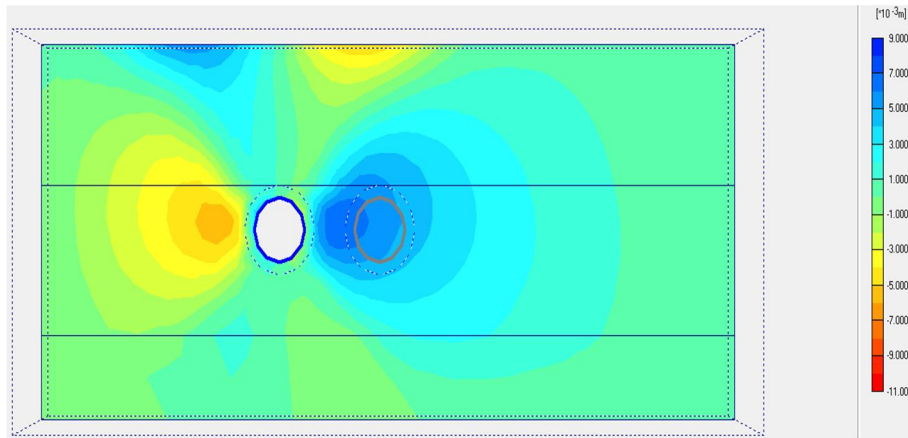
شکل (۷-۲۹) کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD ساختمان‌های مورد

مطالعه را پس از حفر تونل اول نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی هر مقطع در جدول (۷-۱۶)

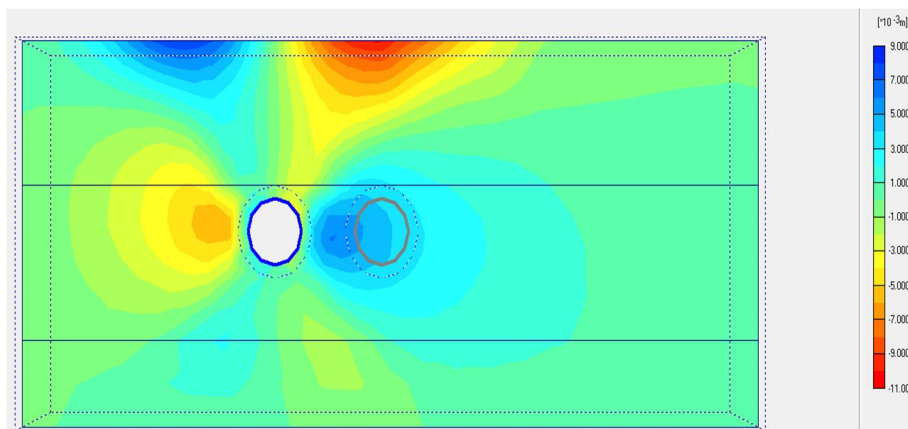
آورده شده است.



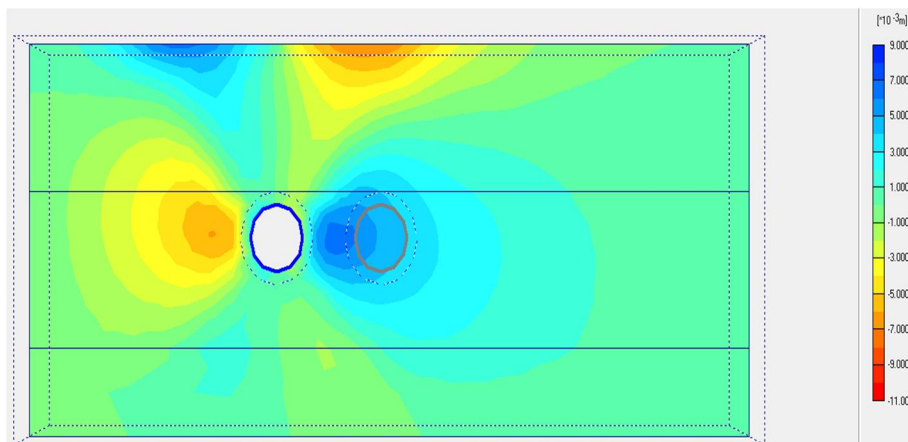
مقطع AB ساختمان ۲۱



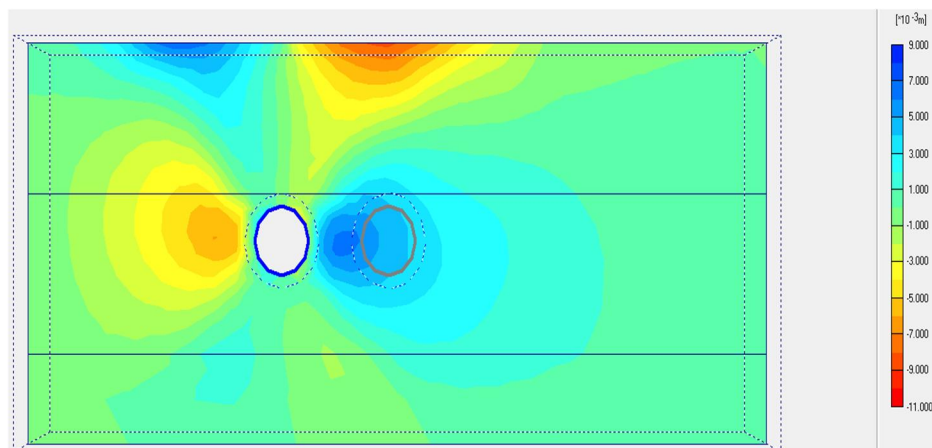
مقطع CD ساختمان ۲۱



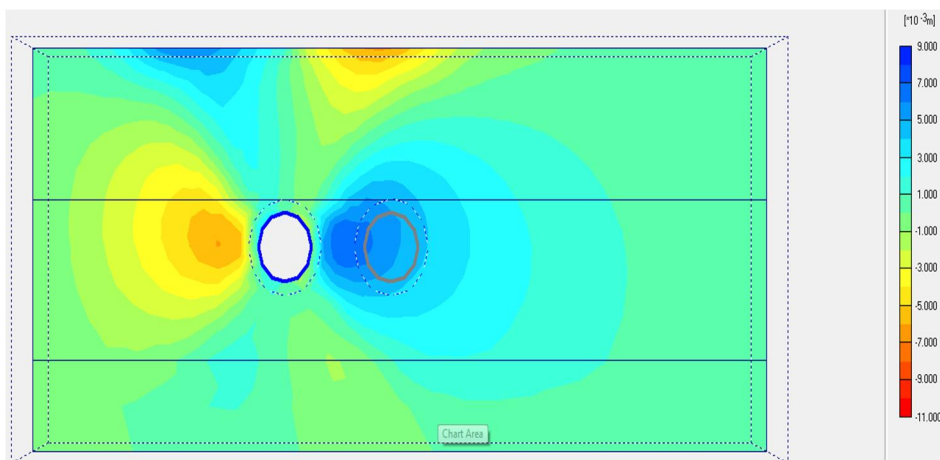
مقطع AB ساختمان ۲۲



مقطع CD ساختمان ۲۲



مقطع AB ساختمان ۲۳



مقطع CD ساختمان ۲۳

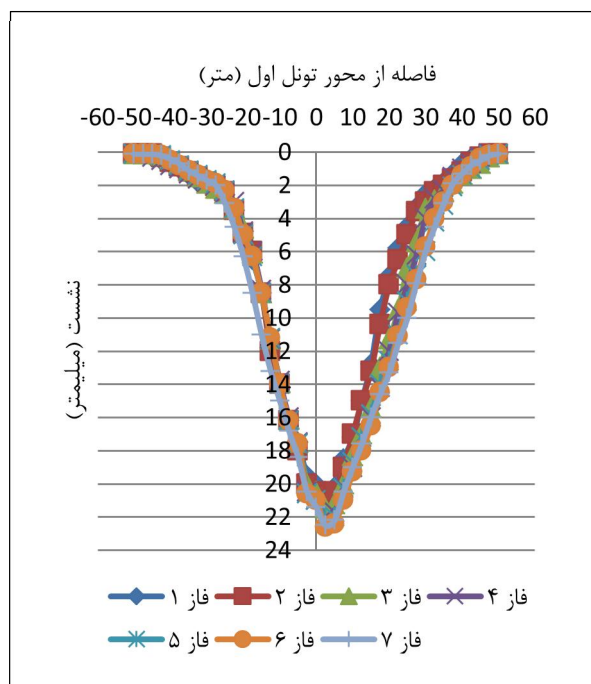
شکل (۷-۲۹) : کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول

جدول (۷-۱۶) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول

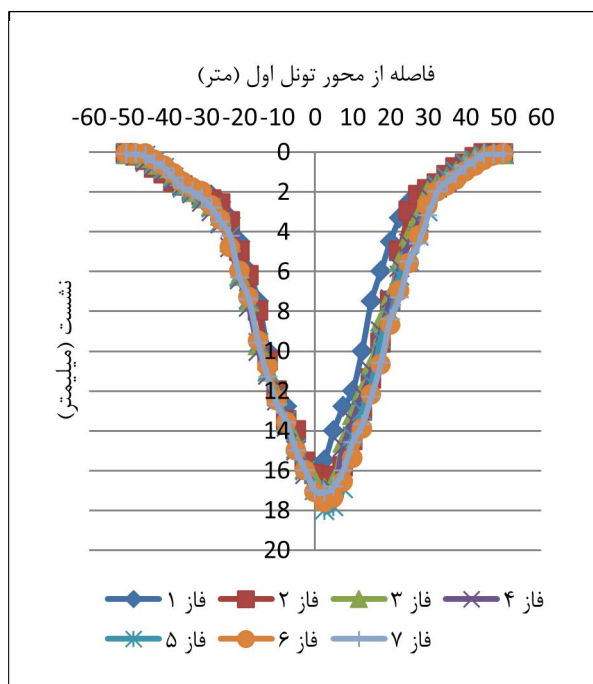
شماره ساختمان	جابجایی افقی سطح مقطع AB (میلیمتر)	جابجایی افقی سطح مقطع CD (میلیمتر)
۲۱	۷	۵
۲۲	۹	۶
۲۳	۶/۸	۵/۶

ج : نشست حاصل از حفاری تونل دوم با وجود ساختمان

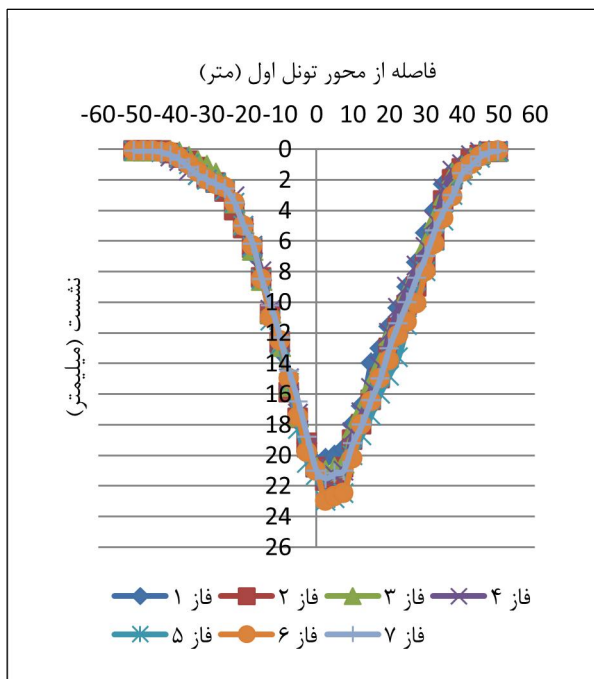
منحنی نشست عرضی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD در مراحل هفت گانه حفاری مقطع، پس از حفر تونل دوم برای ساختمان‌های مقطع ۲ در شکل (۷-۳۰) نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌ها، در تمامی مقاطع در همه فازها منحنی نشست به سمت تونل دوم متمایل شده است و نشست در فازهای مختلف حفاری خیلی نزدیک به هم می‌باشد.



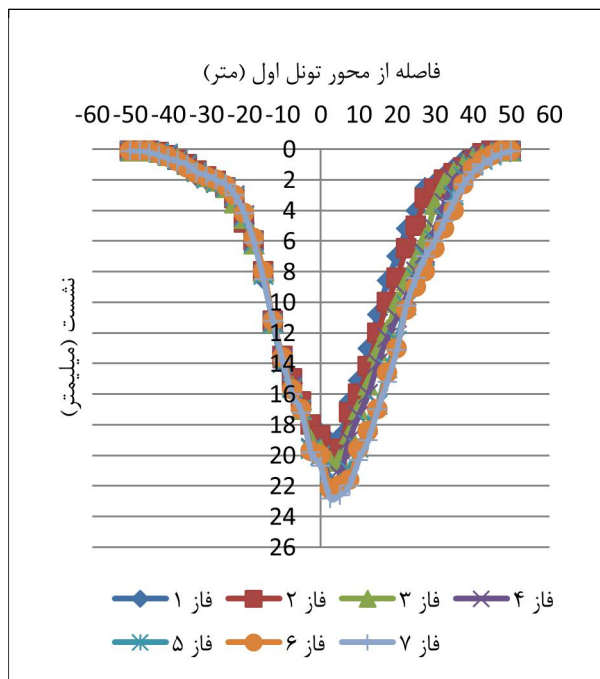
مقطع AB ساختمان ۲۱



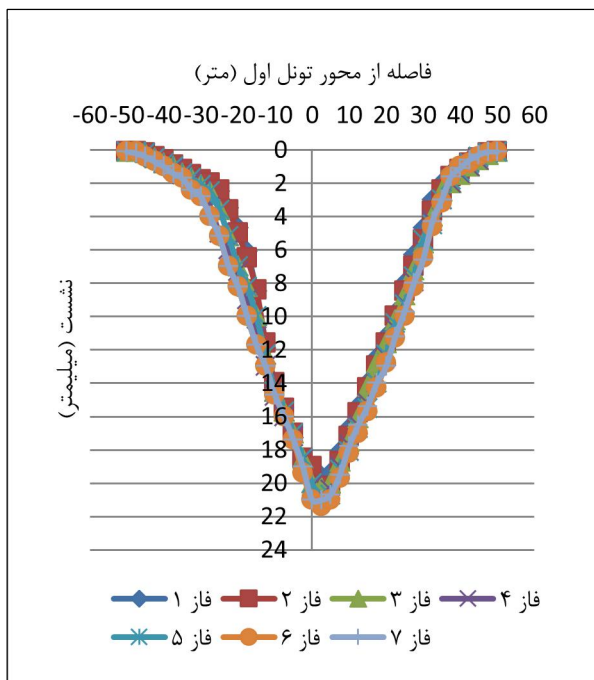
مقطع CD ساختمان ۲۱



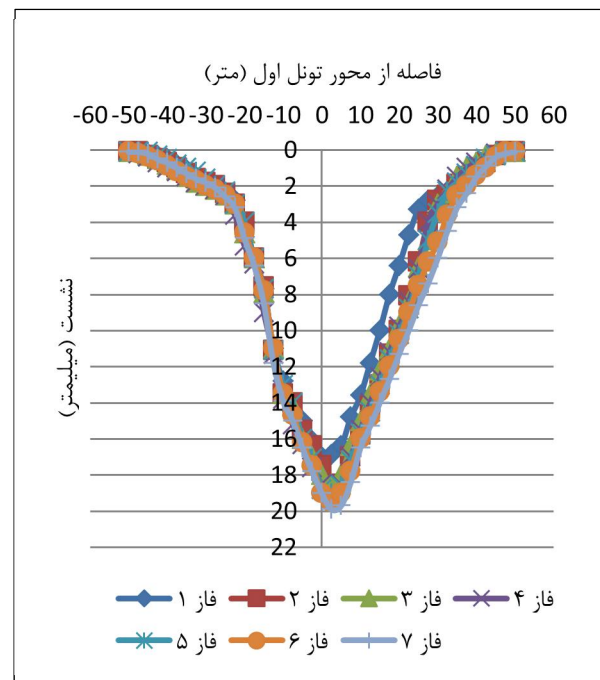
مقطع AB ساختمان ۲۲



مقطع CD ساختمان ۲۲



مقطع AB ساختمان ۲۳

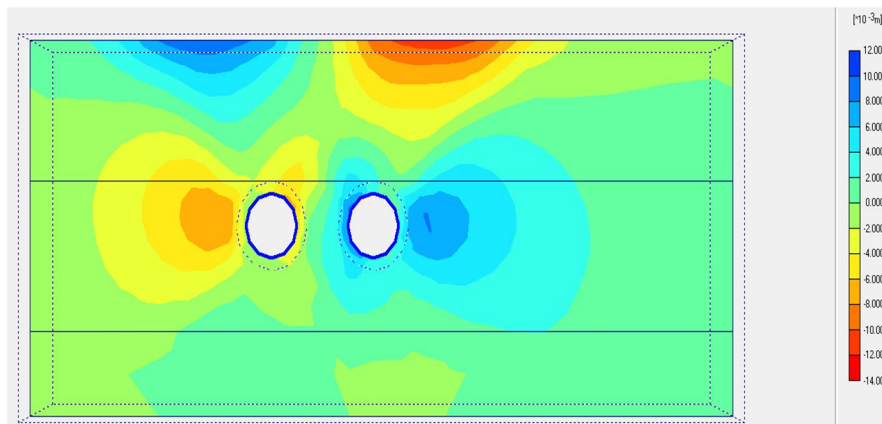


مقطع CD ساختمان ۲۳

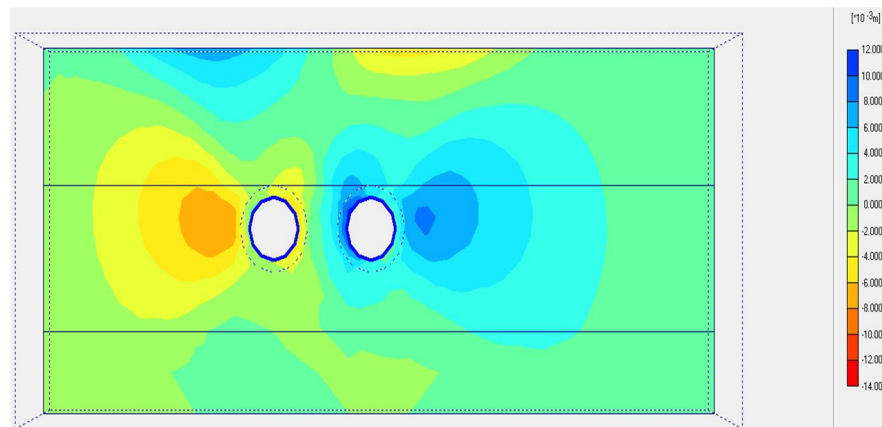
شکل (۷-۳۰): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری

تونل دوم

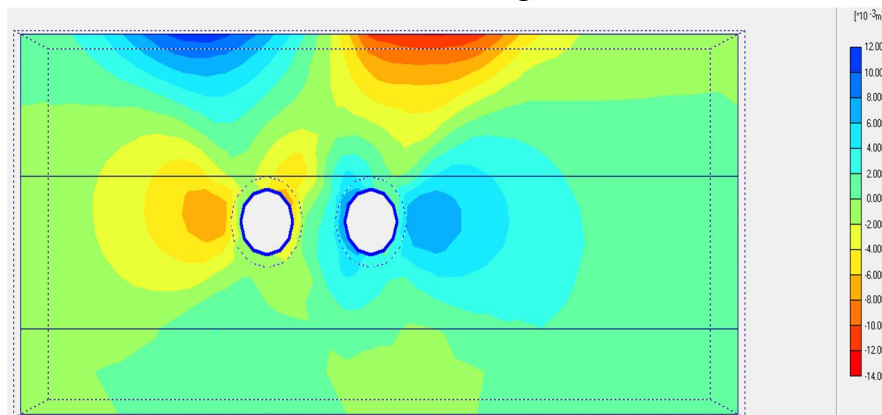
شکل (۷-۳۱) کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD ساختمان‌های مورد مطالعه را پس از حفر تونل دوم نشان می‌دهد که میزان جابجایی افقی هر مقطع در جدول (۷-۱۷) آورده شده است.



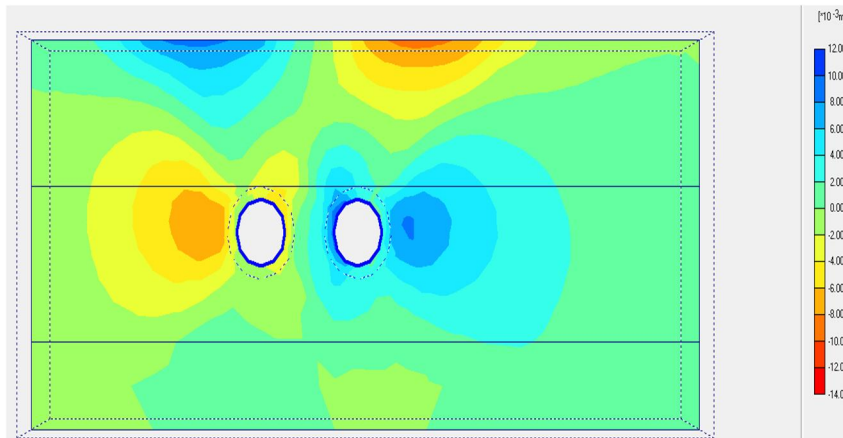
مقطع AB ساختمان ۲۱



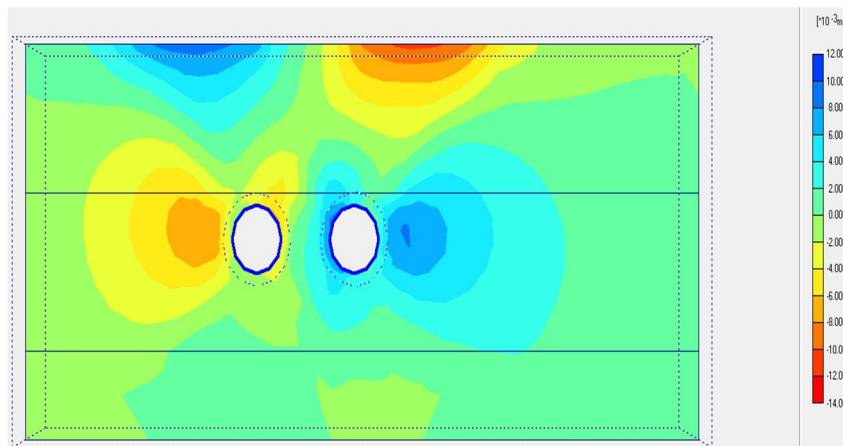
مقطع CD ساختمان ۲۱



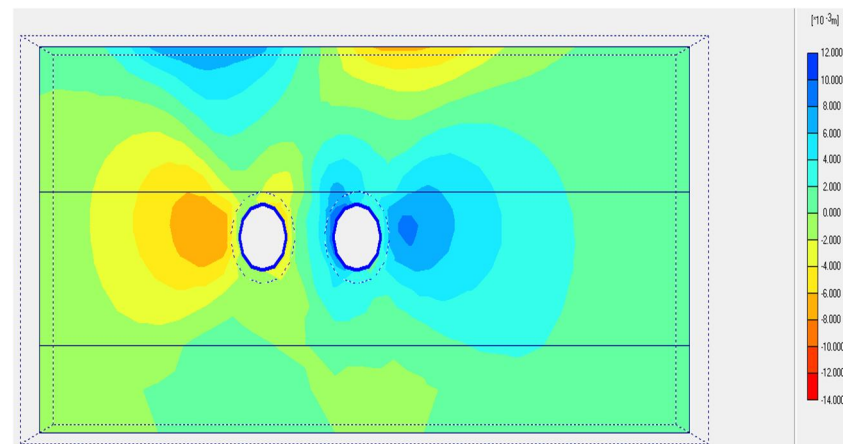
مقطع AB ساختمان ۲۲



مقطع CD ساختمان ۲۲



مقطع AB ساختمان ۲۳



مقطع CD ساختمان ۲۳

شکل (۷-۳۱): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم

جدول (۷-۱۷): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم

شماره ساختمان	جابجایی افقی سطح مقطع AB (میلیمتر)	جابجایی افقی سطح مقطع CD (میلیمتر)
۲۱	۸	۵/۷
۲۲	۱۰/۵	۸/۴
۲۳	۷/۶	۶/۲

د: ارزیابی نتایج نشست ساختمان‌های مقطع ۲

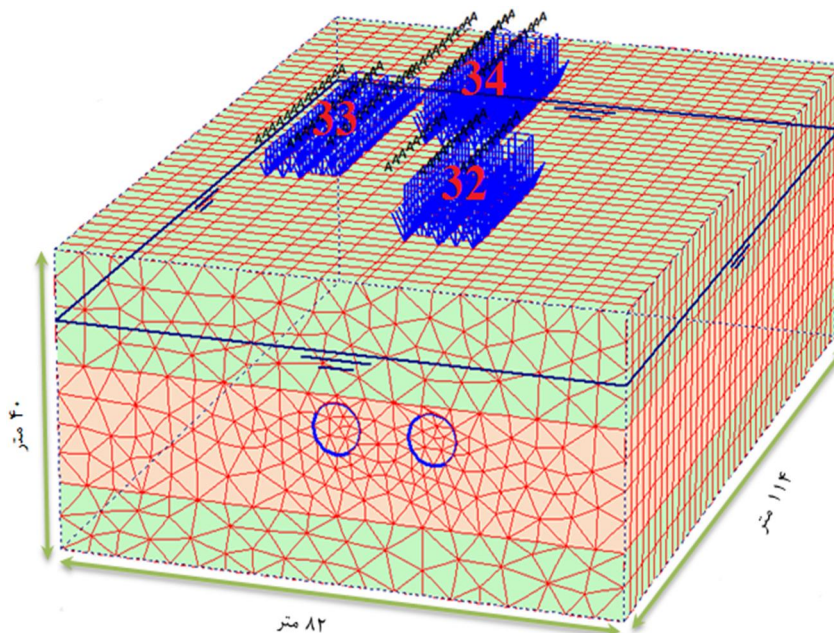
در اینجا از تکرار نتایج نشست در هر فاز خودداری شده و فقط نتایج نشست در فاز نهایی ذکر می‌گردد. میزان نشست در نقاط تعیین شده در زیر پی ساختمان‌ها در جدول (۷-۱۸) درج شده است. بیشترین نشست زیر پی در نقاطی اتفاق می‌افتد که بالای محور تونل قرار دارد و حداقل نشست در نقاطی رخ می‌دهد که در فاصله دورتری از محور تونل‌ها قرار دارند.

جدول (۷-۱۸): مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۲ (میلیمتر)

ساختمان شماره ۲۱								
پس از حفاری تونل دوم				پس از حفاری تونل اول				
D	C	B	A	D	C	B	A	
۱/۲۷	۲/۰۳	۱/۴۸	۲/۶۲	۰/۲۳	۰/۶۰۰	۰/۵۲۷	۰/۸۵۹	نهایی
ساختمان شماره ۲۲								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۳/۱۱	۲/۲۵	۳/۷۵	۲/۵۱	۰/۰۹۴	۰/۰۲۵	۰/۱۳۱	۰/۰۶۹	نهایی
ساختمان شماره ۲۳								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۳/۰۷	۳/۵۰	۳/۵۲	۳/۶۶	۰/۷۱	۰/۳۴۸	۰/۷۵۰	۰/۴۵۱	نهایی

۴-۳-۲-۷ تحلیل نشست ساختمان‌های مقطع ۳

طول، عرض و ارتفاع هندسه مدل برای این مقطع به ترتیب ۱۱۴ متر، ۸۲ متر و ۴۰ متر و نوع مش‌بندی متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر یک از تونل‌ها با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، ۳۸ فاز حفاری در نظر گرفته شده که در مجموع برای کل مدل ۷۶ فاز حفاری تا انتهای مدل صورت گرفته است. شکل (۳۲-۷) موقعیت ساختمان‌های مقطع شماره ۳ را نشان می‌دهد. مشخصات هندسی مدل ساخته شده و همچنین ضخامت پی ساختمان‌ها و تاثیر بار هر یک از ساختمان‌ها در مسیر حفاری برای مقطع ۳ به ترتیب در جدول (۱۹-۷) و (۲۰-۷) آورده شده است.



شکل (۳۲-۷): مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۳

جدول (۱۹-۷): مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۳

شماره مقطع	روباره (متر)	عمق کف تونل (متر)	عرض مدل (متر)	ارتفاع مدل (متر)	طول مدل (متر)	تعداد المان‌ها
۳	۱۵/۸	۲۲/۶۸	۸۲	۴۰	۱۱۴	۱۰۴۷۹

جدول (۷-۲۰): مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۳

شماره ساختمان	بار گسترده (KN)	ضخامت پی (m)
۳۲	۲۰	۰/۵
۳۳	۱۰	۰/۵
۳۴	۲۰	۰/۵

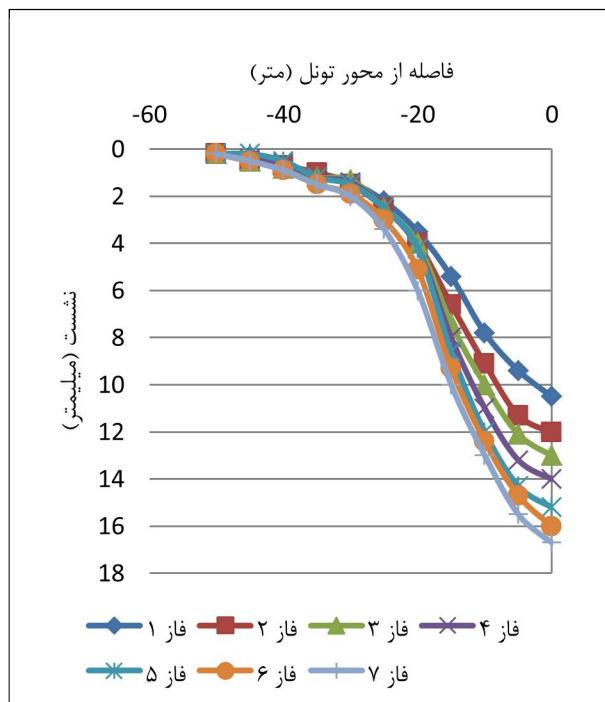
الف: تحلیل نشست در حالت سطح آزاد

در این بخش از تحلیل‌ها، نشست سطح زمین در حالت بدون وجود ساختمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور با توجه به موقعیت قرارگیری ساختمان‌ها در راستای طولی تونل در تحلیل‌های بعدی، سطح مقطع نشان داده شده در جدول (۷-۲۱) مورد بررسی قرار می‌گیرد. منظور از مقاطع مورد بررسی در طول تونل، سطح مقطعی هستند که ابتدا و انتهای هر ساختمان در آن مقطع از طول تونل قرار می‌گیرند.

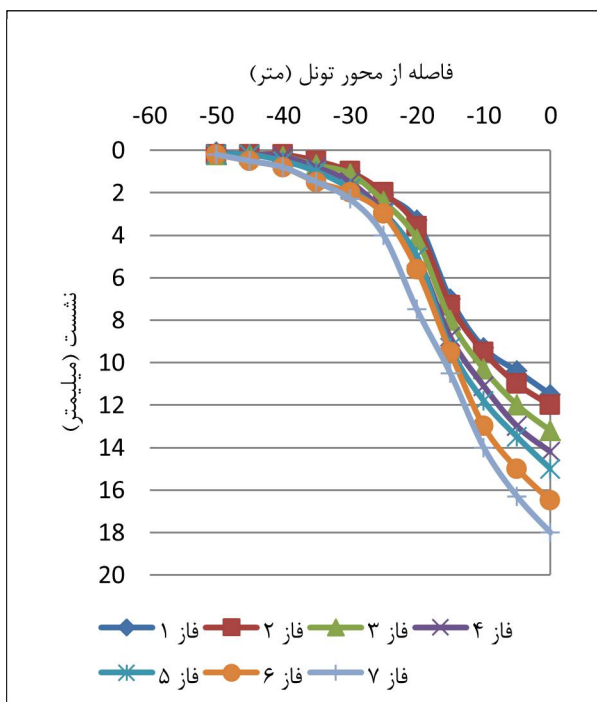
جدول (۷-۲۱): مقاطع مورد بررسی

شماره ساختمان	مقطع مورد بررسی (متر)
۳۲	۳۳ و ۲۱
۳۳	۵۱ و ۳۳
۳۴	۶۰ و ۴۵

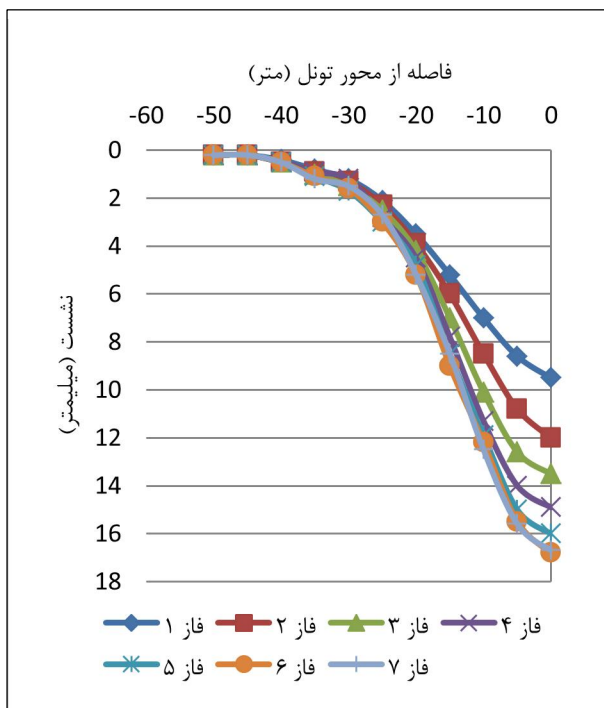
منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین در مراحل مختلف حفاری تونل، برای حالت سطح آزاد برای سطح مقطع مورد بررسی در شکل (۷-۳۳) ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود، مانند مقاطع قبلی در تمامی مقاطع میزان نشست در هر فاز بیشتر از فاز قبلی بوده، که دلیل این موضوع را می‌توان ناشی از افزایش ابعاد فضای حفاری در پایان هر فاز، نسبت به فاز قبلی دانست. با توجه به منحنی‌های نشست عرضی می‌توان فاصله ۴۰ متری از محور مرکزی تونل را به عنوان محدوده تاثیر حفاری تونل در جهت عرضی در سطح زمین در نظر گرفت.



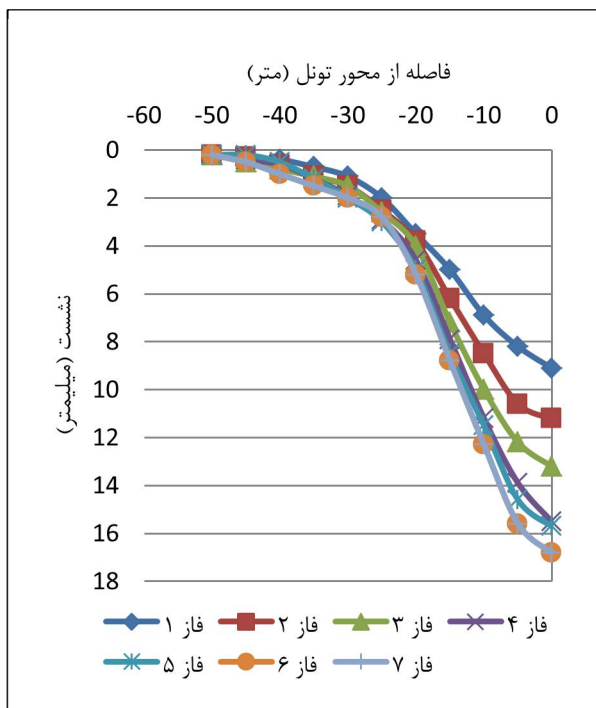
مقطع ۳۳ متری طول تونل



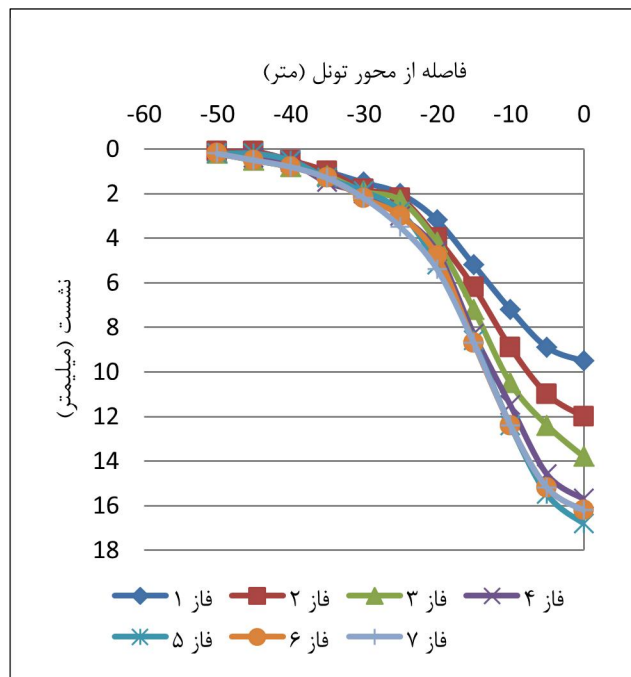
مقطع ۲۱ متری طول تونل



مقطع ۴۵ متری طول تونل



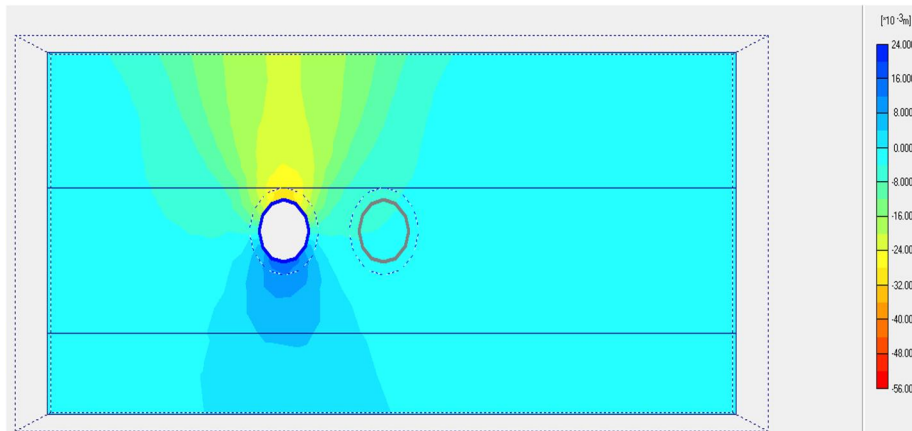
مقطع ۵۱ متری طول تونل



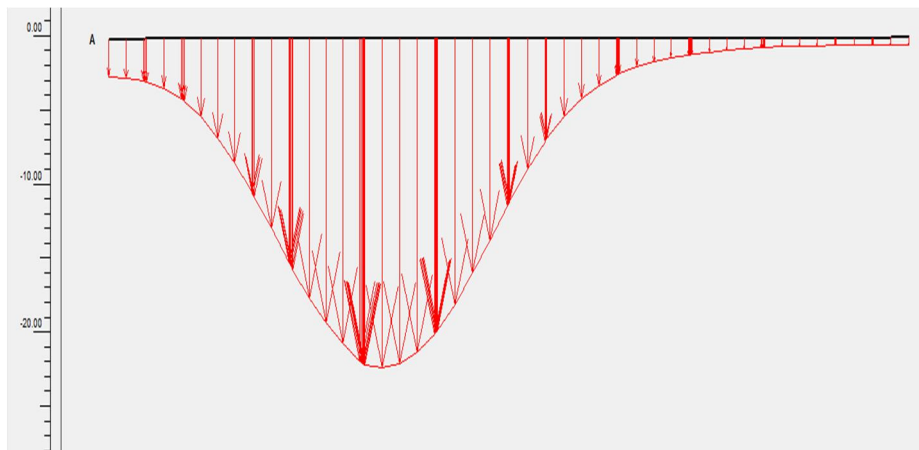
مقطع ۶۰ متری طول تونل

شکل (۷-۳۳): منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۳ در مراحل مختلف حفاری

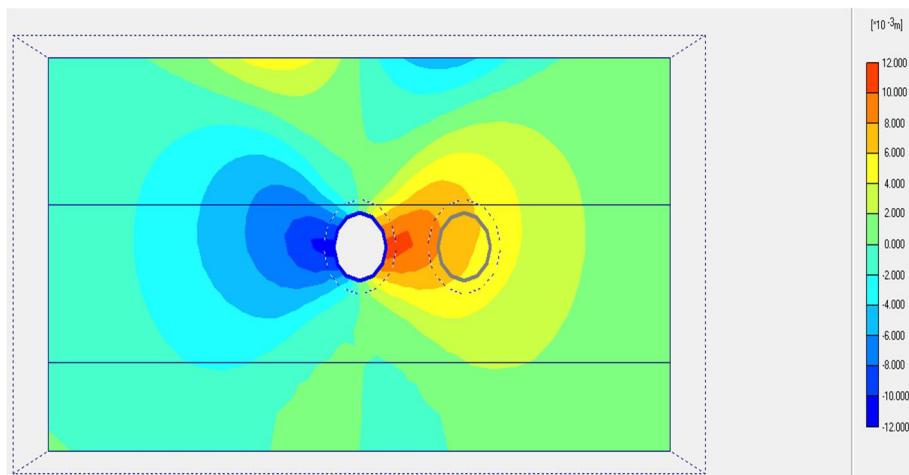
ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول با توجه به شکل (۷-۳۴) حدود ۲۴ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۳۵) پروفیل نشست سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم نشست حدود ۲۴ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۳۶) کنتور جابجایی افقی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی حدود ۵ میلیمتر می‌باشد و در فاصله ۸ متری از محور تونل اتفاق می‌افتد.



شکل (۷-۳۴): کنتور جابجایی قائم مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول

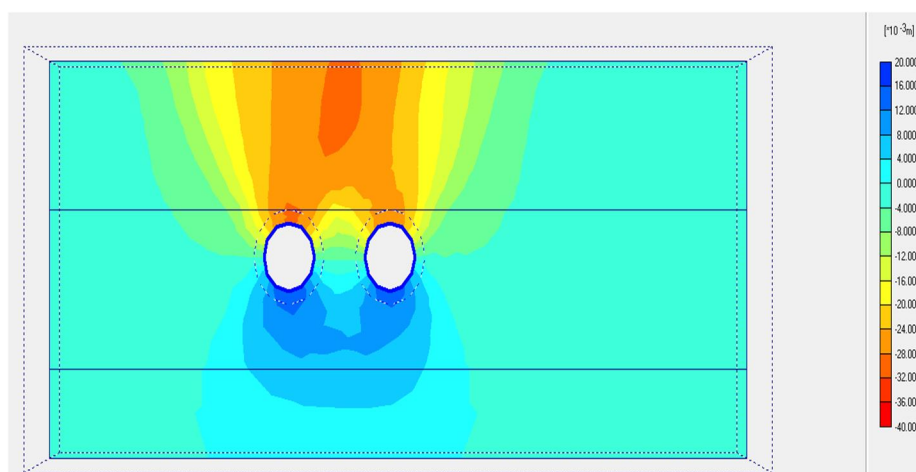


شکل (۷-۳۵): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول

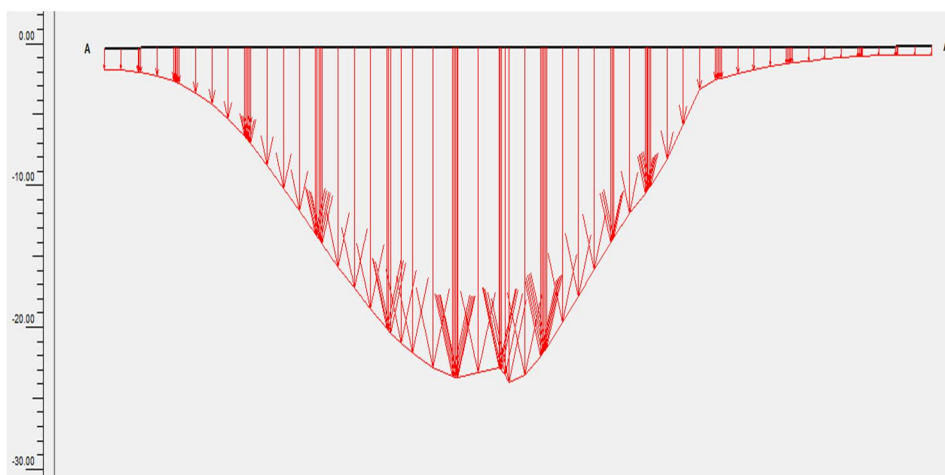


شکل (۷-۳۶): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول

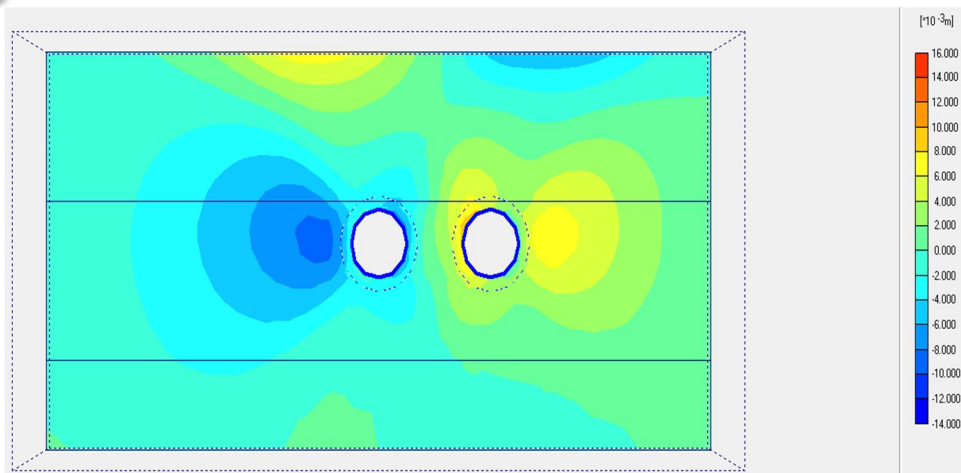
ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل دوم با توجه به شکل (۷-۳۷) حدود ۲۸ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۳۸) پروفیل نشست سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم نشست حدود ۲۸ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۳۹) کنتور جابجایی افقی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی حدود ۷ میلیمتر می‌باشد و در فاصله ۱۲ متری از مرکز دو تونل اتفاق می‌افتد.



شکل (۷-۳۷): کنتور جابجایی قائم مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم



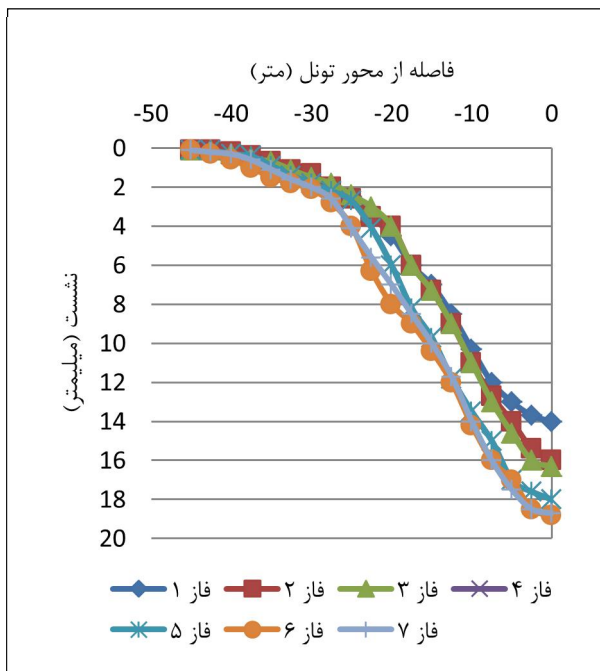
شکل (۷-۳۸): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم



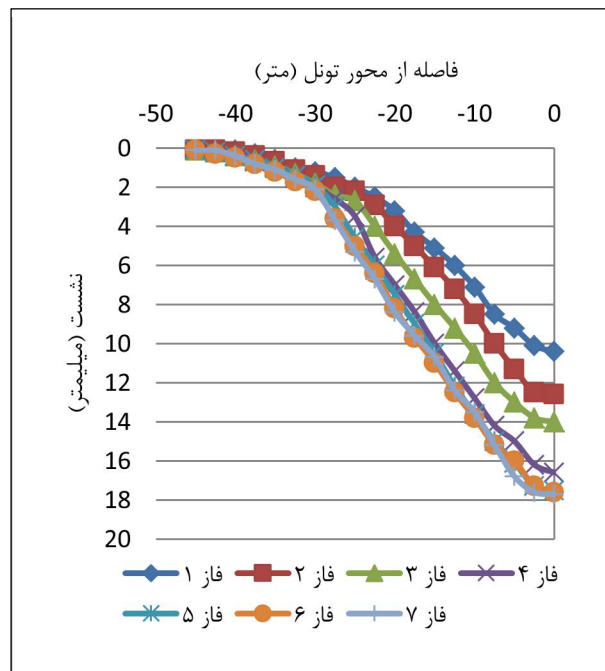
شکل (۷-۳۹): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم

ب: نشست حاصل از حفاری تونل اول با وجود ساختمان

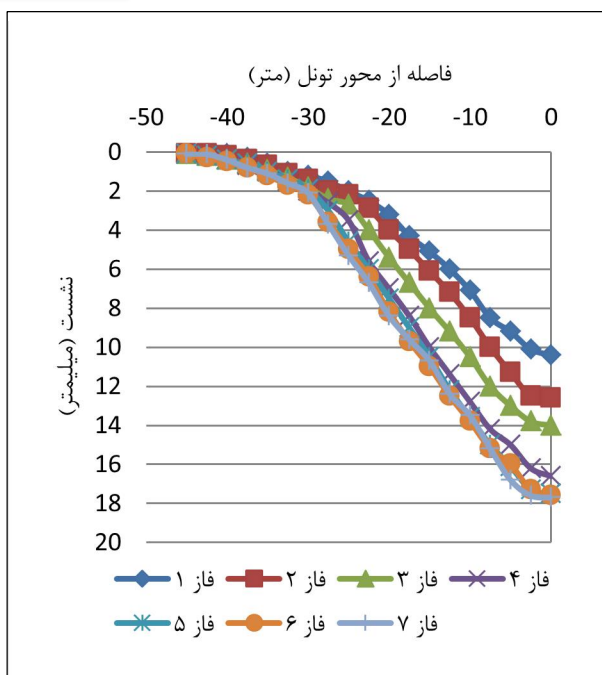
منحنی نشست عرضی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD در مراحل هفت‌گانه حفاری مقطع تونل، پس از حفر تونل اول برای ساختمان‌های مقطع ۳ در شکل (۷-۴۰) نشان داده شده است. مشابه حالت سطح آزاد، نشست در هر فاز بیشتر از فاز قبلی می‌باشد.



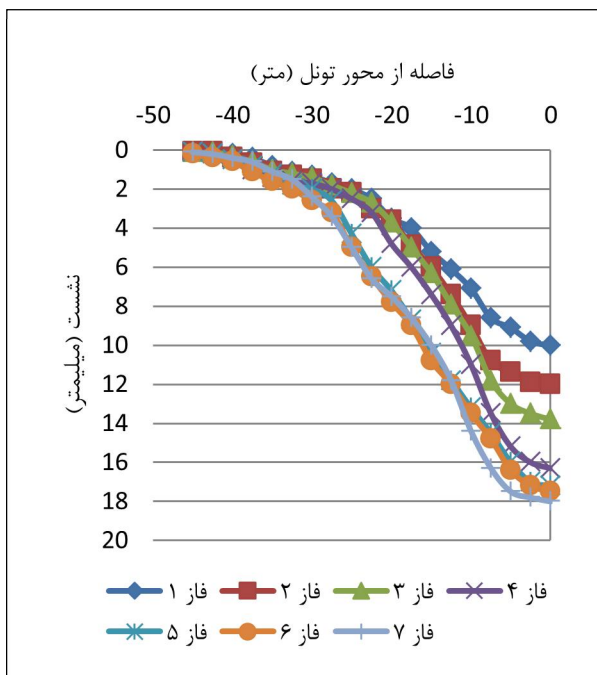
مقطع AB ساختمان ۳۲



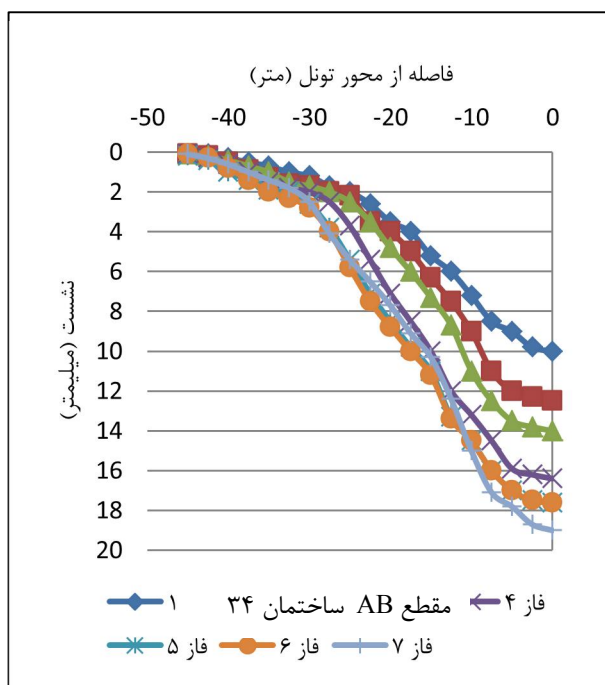
مقطع CD ساختمان ۳۲



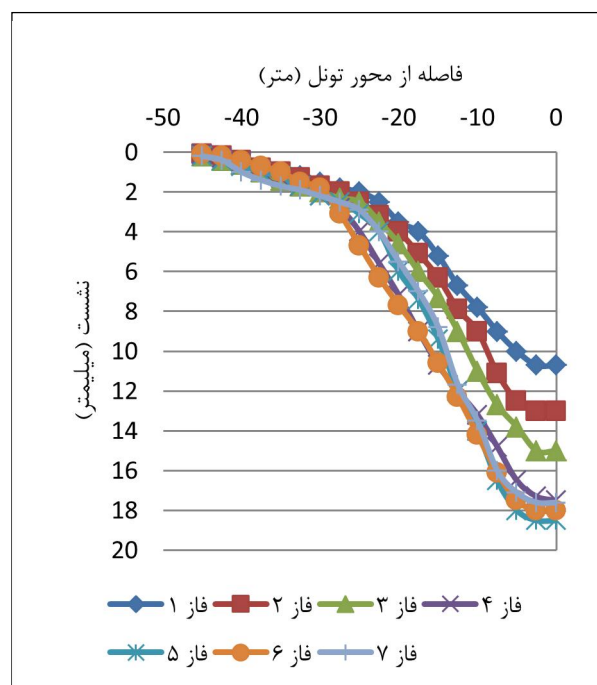
مقطع AB ساختمان ۳۳



مقطع CD ساختمان ۳۳



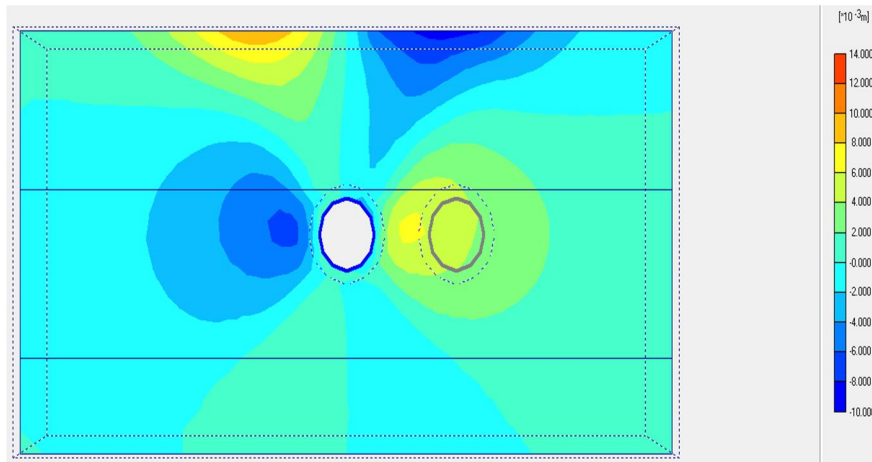
مقطع AB ساختمان ۳۴



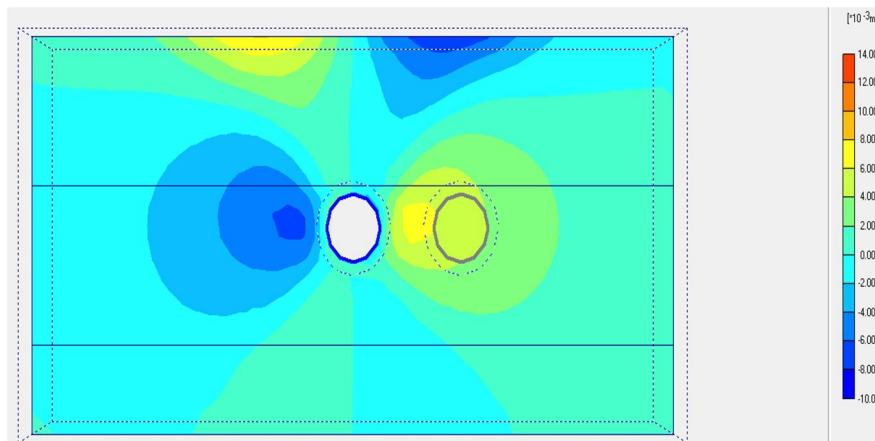
مقطع CD ساختمان ۳۴

شکل (۷-۴): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول

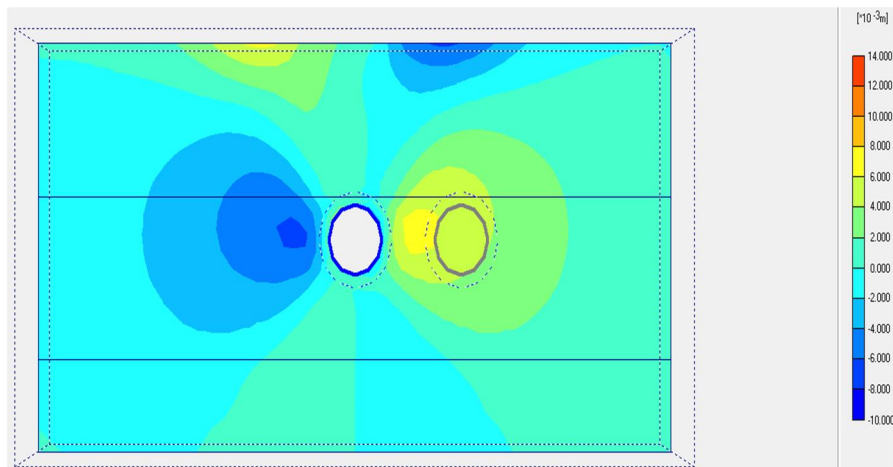
شکل (۷-۴۱) کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD ساختمان‌های مورد مطالعه را پس از حفر تونل اول نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی هر مقطع در جدول (۷-۲۲) آورده شده است.



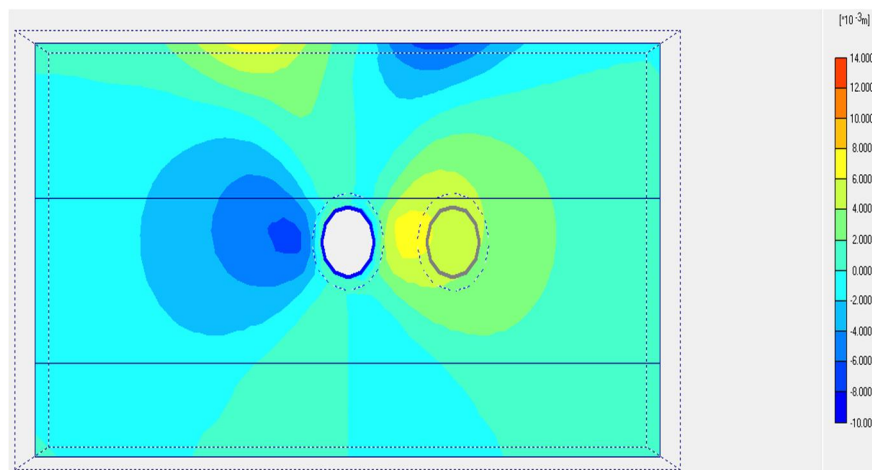
مقطع AB ساختمان ۳۲



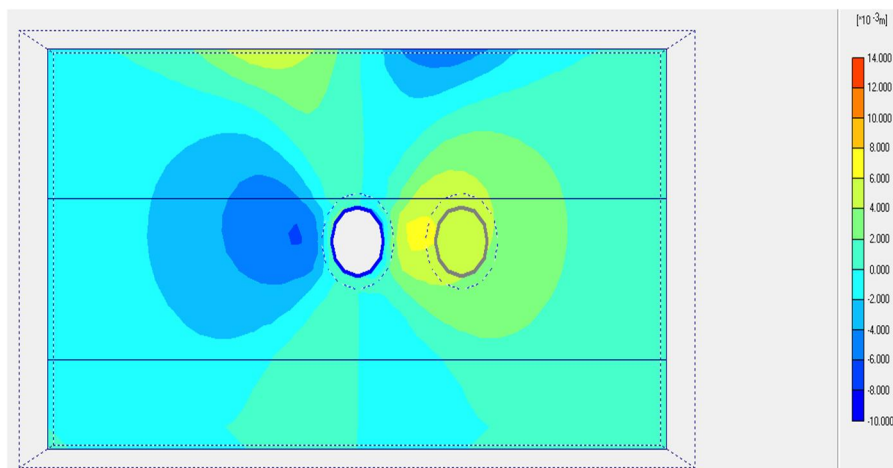
مقطع CD ساختمان ۳۲ و AB ساختمان ۳۳



مقطع CD ساختمان ۳۲



مقطع AB ساختمان ۳۴



مقطع CD ساختمان ۳۴

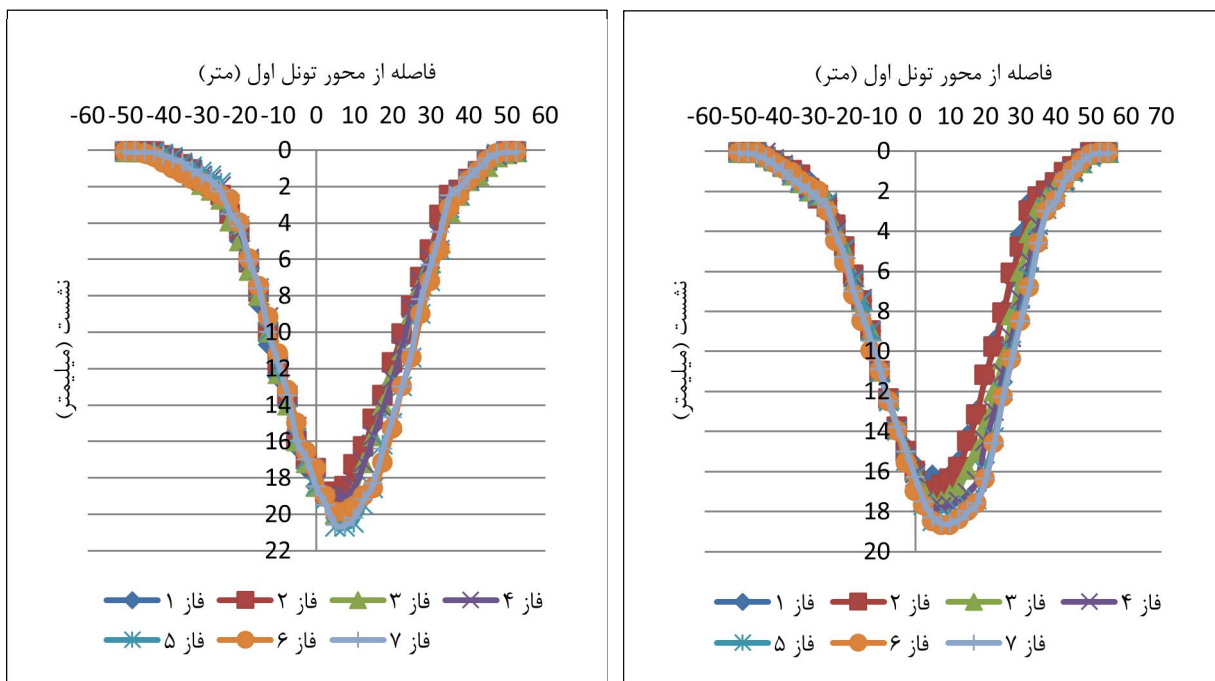
شکل (۷-۴۱): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول

جدول (۷-۲۲): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول

شماره ساختمان	جابجایی افقی سطح مقطع AB (میلیمتر)	جابجایی افقی سطح مقطع CD (میلیمتر)
۳۲	۸/۴	۸
۳۳	۸	۷
۳۴	۸/۲	۶/۲

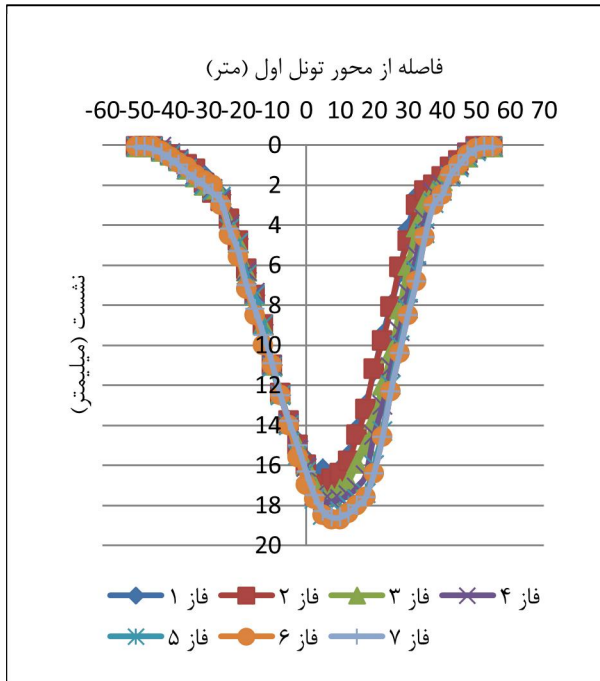
ج: نشست حاصل از حفاری تونل دوم با وجود ساختمان

منحنی نشست عرضی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD در مراحل هفت‌گانه حفاری مقطع، پس از حفر تونل دوم برای ساختمان‌های مقطع ۳ در شکل (۷-۴۲) نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌ها، در تمامی مقاطع در همه فازها منحنی نشست به سمت تونل دوم متمایل شده است و نشست در فازهای مختلف حفاری خیلی نزدیک به هم می‌باشد.

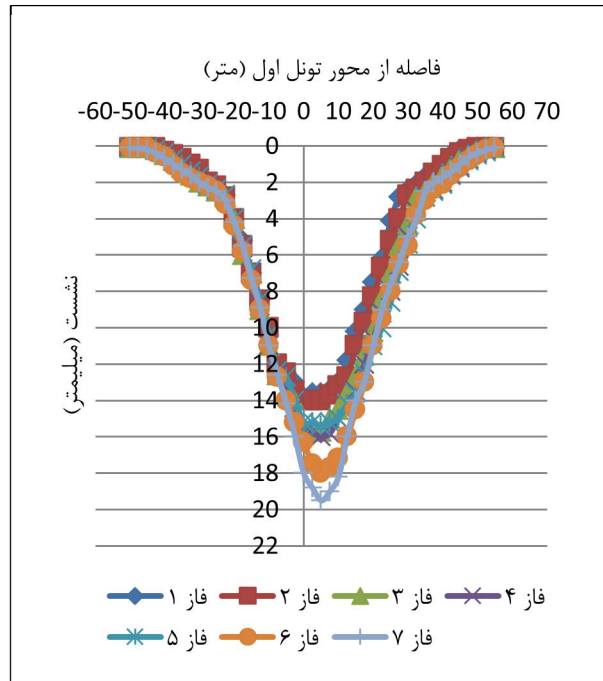


مقطع AB ساختمان ۳۲

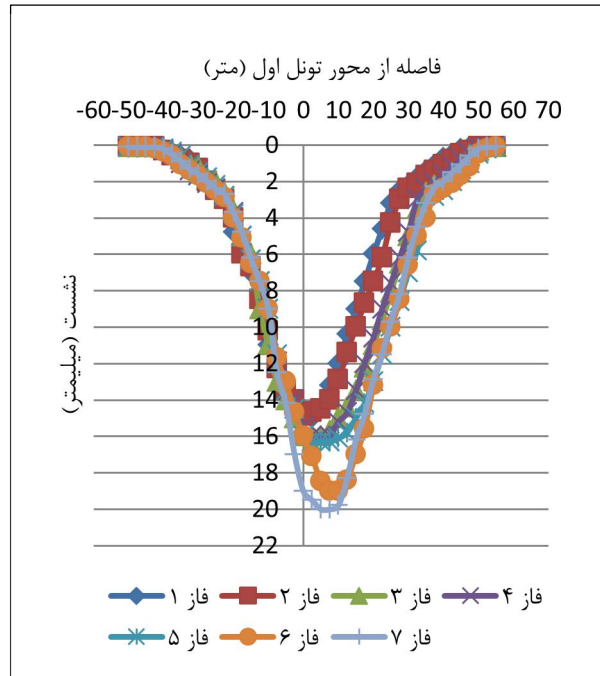
مقطع CD ساختمان ۳۲



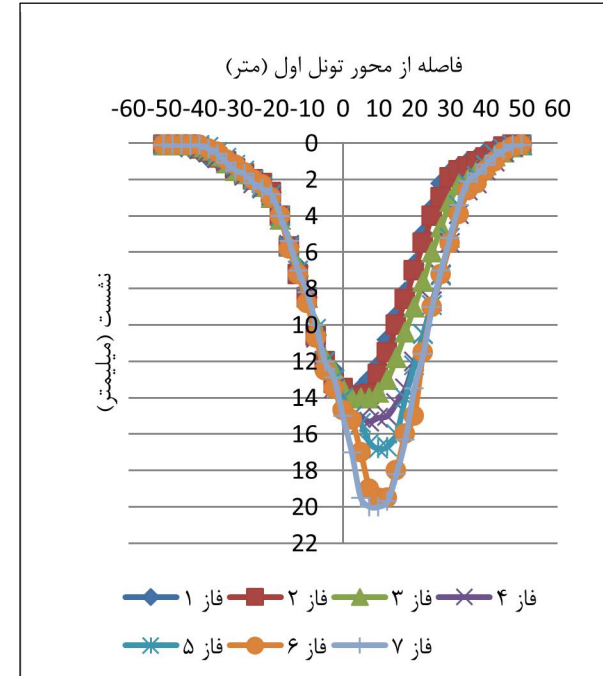
مقطع AB ساختمان ۳۳



مقطع CD ساختمان ۳۳



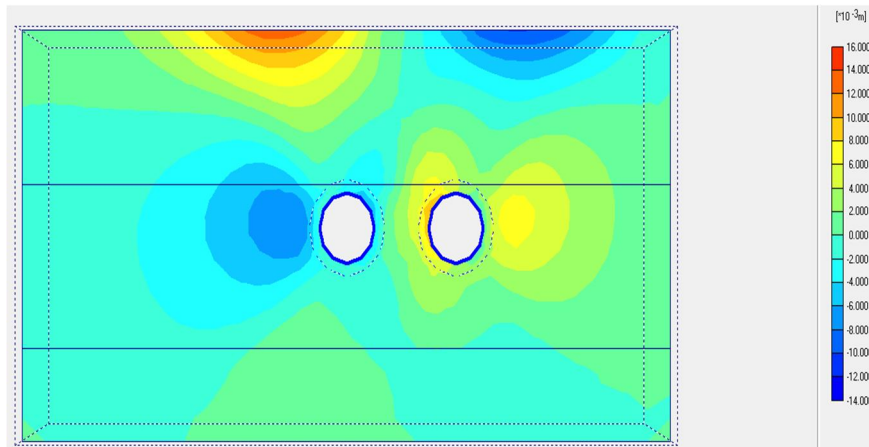
مقطع AB ساختمان ۳۴



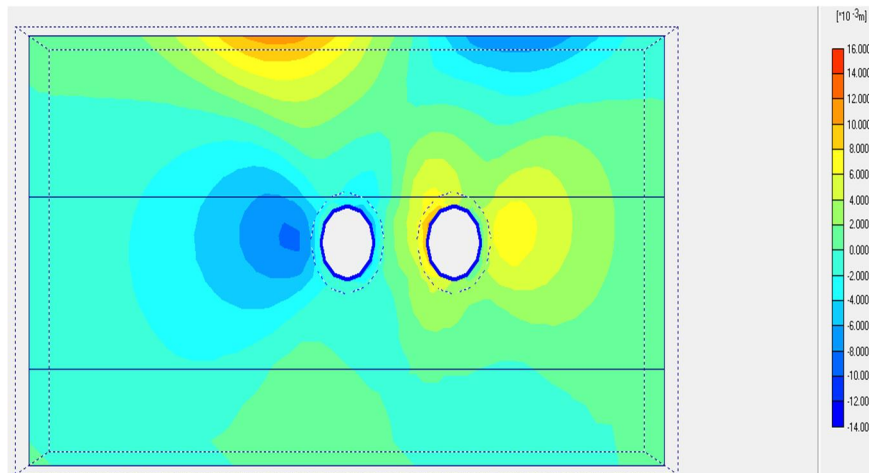
مقطع CD ساختمان ۳۴

شکل (۷-۴۲): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم

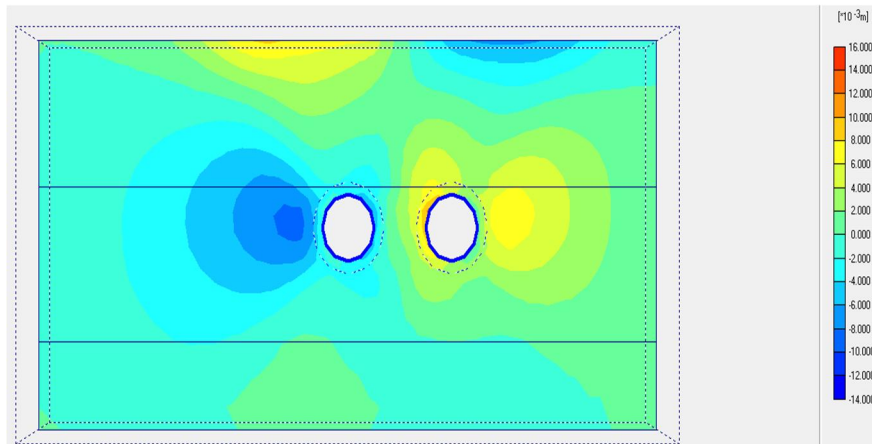
شکل (۷-۴۳) کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD ساختمان‌های مورد مطالعه را پس از حفر تونل دوم نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی هر مقطع در جدول (۷-۲۳) آورده شده است.



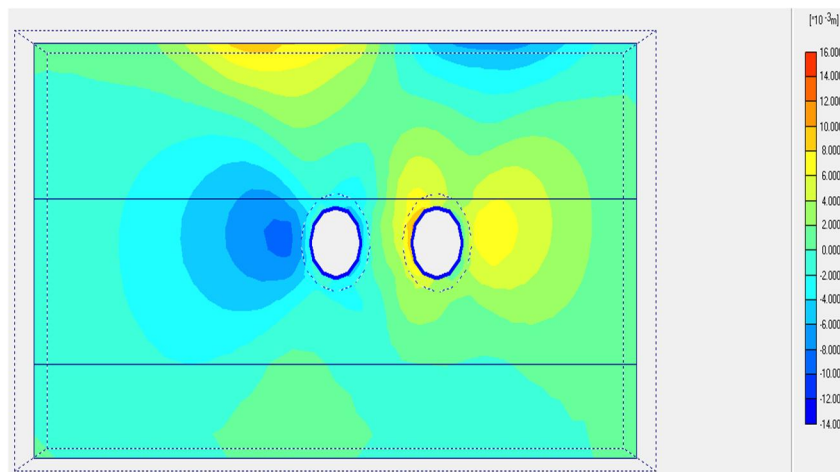
مقطع AB ساختمان ۳۲



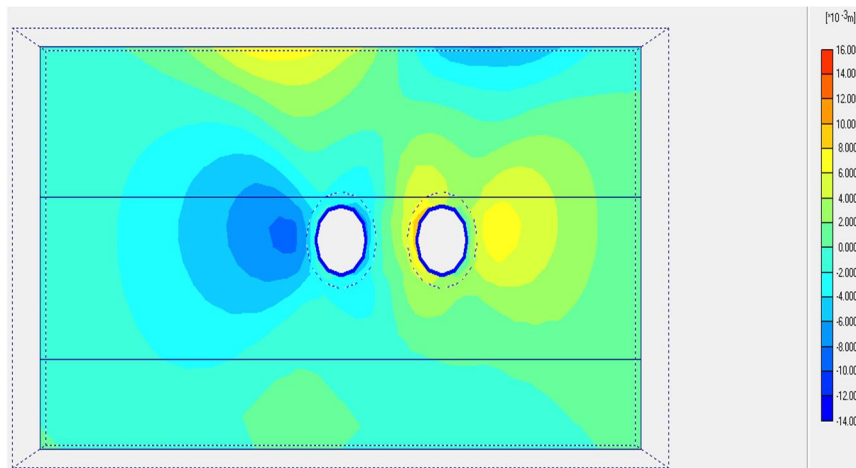
مقطع CD ساختمان ۳۲ و AB ساختمان ۳۳



مقطع CD ساختمان ۳۳



مقطع AB ساختمان ۳۲



مقطع CD ساختمان ۳۲

شکل (۷-۴۳): کنورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم

جدول (۷-۲۳): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم

شماره ساختمان	جابجایی افقی سطح مقطع AB (میلیمتر)	جابجایی افقی سطح مقطع CD (میلیمتر)
۳۲	۱۰/۵	۱۰/۱
۳۳	۱۰/۱	۸
۳۴	۹	۷

د: ارزیابی نتایج نشست ساختمان‌های مقطع ۳

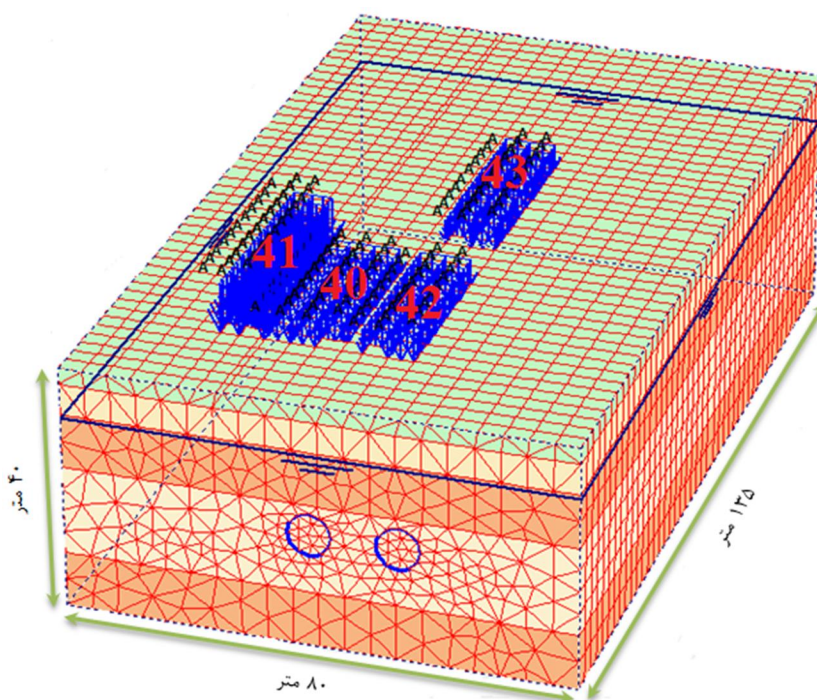
در اینجا از تکرار نتایج نشست در هر فاز خودداری شده و فقط نتایج نشست در فاز نهایی ذکر می‌گردد. میزان نشست در نقاط تعیین شده در زیر پی ساختمان‌ها در جدول (۷-۲۴) درج شده است. همانند ساختمان‌های مقاطع ۱ و ۲، بیشترین نشست زیر پی در نقاط نزدیک محور تونل و بالای محور تونل و حداقل نشست در نقاط دورتر از محور تونل رخ داده است.

جدول (۷-۲۴): مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۳ (میلیمتر)

ساختمان شماره ۳۲								
پس از حفاری تونل دوم				پس از حفاری تونل اول				
D	C	B	A	D	C	B	A	
۴/۱۲	۴/۵۲	۴/۵۷	۵/۲۳	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۹۷	۰/۷۵۲	نهایی
ساختمان شماره ۳۳								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۱/۱۲	۱/۴۰	۱/۴۶	۲/۲۱	۰/۰۱۵	۰/۰۲۷	۰/۰۲۶	۰/۰۵۱	نهایی
ساختمان شماره ۳۴								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۳/۲۳	۴/۰۰	۳/۳۹	۴/۱۲	۰/۶۲۶	۱/۰۵	۰/۸۵۱	۱/۲۰	نهایی

۵-۳-۲-۷ تحلیل نشست ساختمان‌های مقطع ۴

طول، عرض و ارتفاع هندسه مدل برای این مقطع به ترتیب ۱۳۵ متر، ۸۰ متر و ۴۰ متر و نوع مش‌بندی متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر یک از تونل‌ها با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، ۴۵ فاز حفاری در نظر گرفته شده که در مجموع برای کل مدل ۹۰ فاز حفاری تا انتهای مدل صورت گرفته است. شکل (۷-۴۴) موقعیت ساختمان‌های مقطع شماره ۴ را نشان می‌دهد. مشخصات هندسی مدل ساخته شده و همچنین ضخامت پی ساختمان‌ها و تاثیر بار هر یک از ساختمان‌ها در مسیر حفاری برای مقطع ۴ به ترتیب در جدول (۷-۲۵) و (۷-۲۶) آورده شده است



شکل (۷-۴۴): مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۴

جدول (۷-۲۵): مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۴

شماره مقطع	روباره (متر)	عمق کف تونل (متر)	عرض مدل (متر)	ارتفاع مدل (متر)	طول مدل (متر)	تعداد المان‌ها
۴	۱۷/۹	۲۴/۷۸	۸۰	۴۰	۱۳۵	۶۳۰۲

جدول (۷-۲۶): مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۴

شماره ساختمان	بار گسترده (KN)	ضخامت پی (m)
۴۰	۱۰	۰/۵
۴۱	۲۰	۰/۵
۴۲	۱۰	۰/۵
۴۳	۱۰	۰/۵

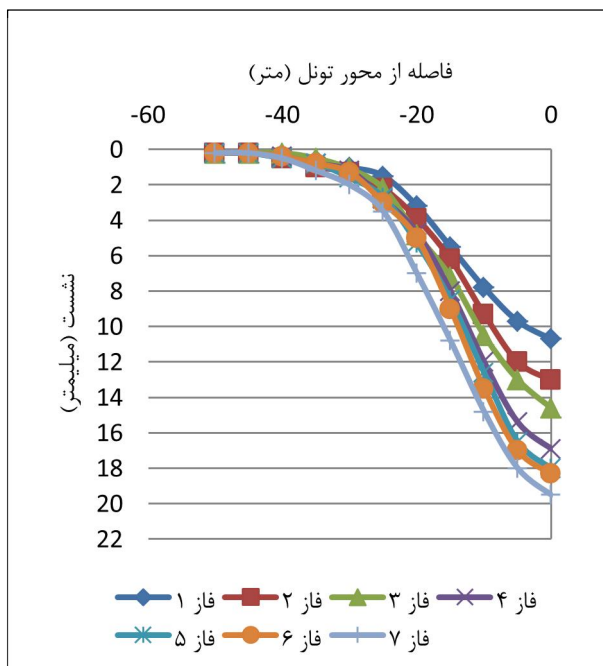
الف: تحلیل نشست در حالت سطح آزاد

در این بخش از تحلیل‌ها، نشست سطح زمین در حالت بدون وجود ساختمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور با توجه به موقعیت قرارگیری ساختمان‌ها در راستای طولی تونل در تحلیل‌های بعدی، سطح مقطع نشان داده شده در جدول (۷-۲۷) مورد بررسی قرار می‌گیرد. منظور از مقاطع مورد بررسی در طول تونل، سطح مقطعی هستند که ابتدا و انتهای هر ساختمان در آن مقطع از طول تونل قرار می‌گیرند.

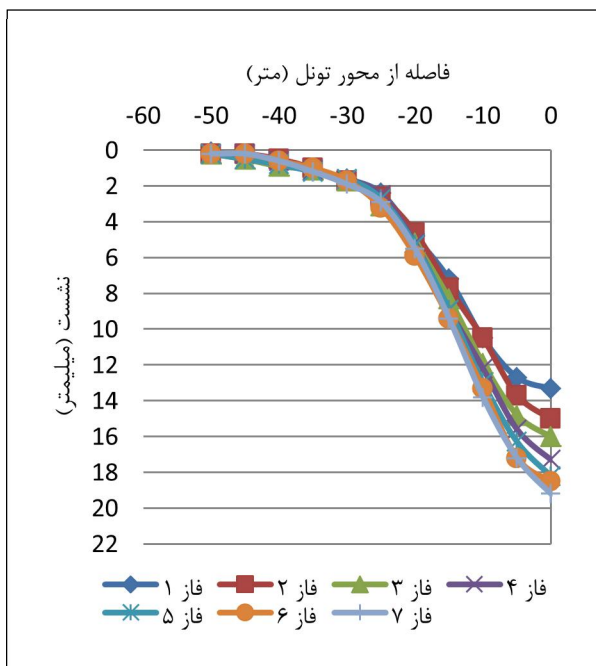
جدول (۷-۲۷): مقاطع مورد بررسی

شماره ساختمان	مقطع مورد بررسی (متر)
۴۰	۳۳ و ۲۱
۴۱	۳۶ و ۲۱
۴۲	۳۳ و ۲۱
۴۳	۶۹ و ۵۱

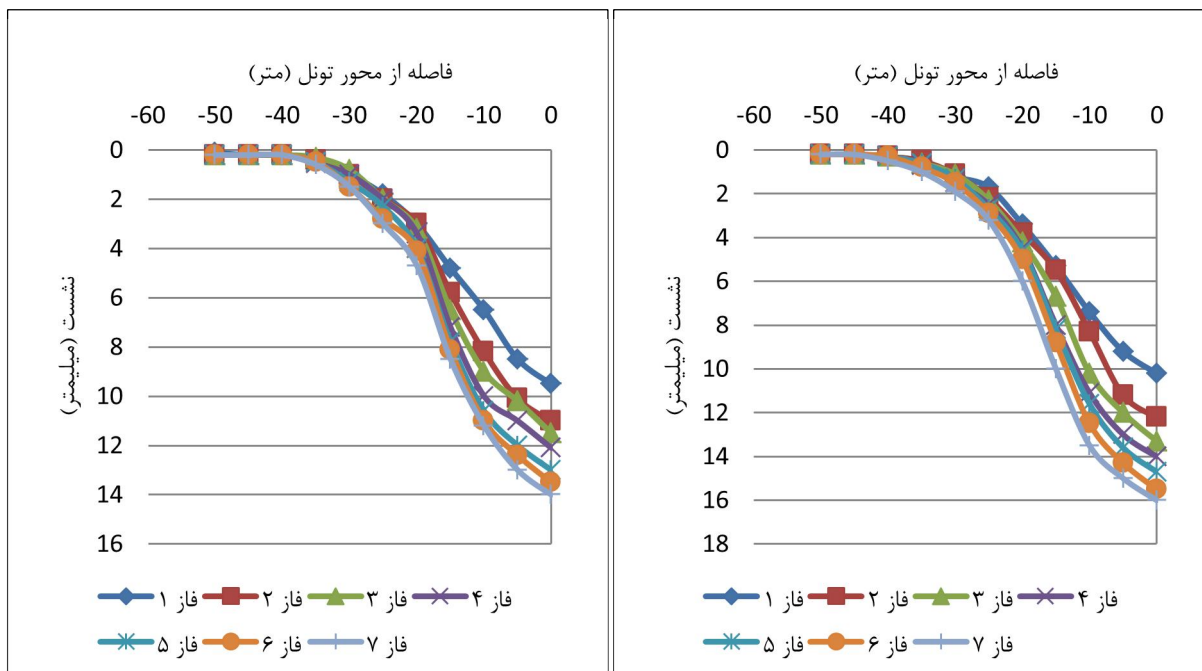
منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین در مراحل مختلف حفاری تونل، برای حالت سطح آزاد برای سطح مقاطع مورد بررسی در شکل (۷-۴۵) ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود، در تمامی مقاطع میزان نشست در هر فاز بیشتر از فاز قبلی بوده، که دلیل این موضوع را می‌توان ناشی از افزایش ابعاد فضای حفاری در پایان هر فاز، نسبت به فاز قبلی دانست. با توجه به منحنی‌های نشست عرضی می‌توان فاصله ۴۰ متری از محور مرکزی تونل را به عنوان محدوده تاثیر حفاری تونل در جهت عرضی در سطح زمین در نظر گرفت.



مقطع ۳۳ متری طول تونل

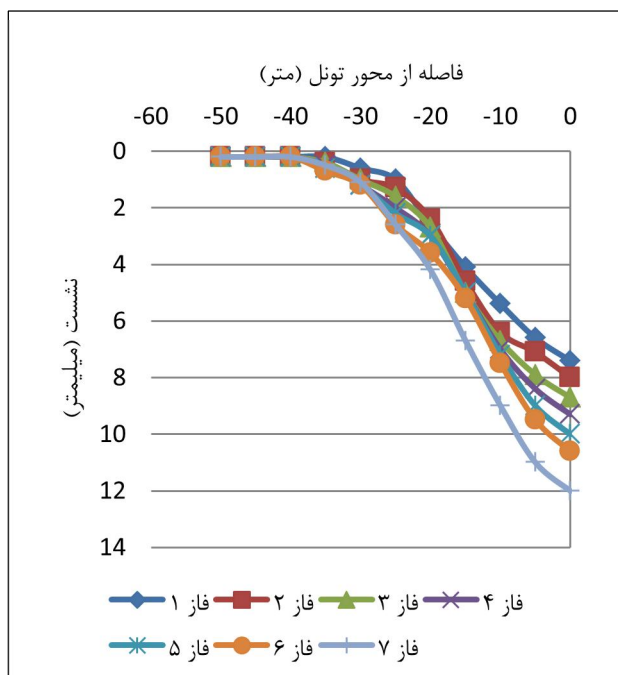


مقطع ۲۱ متری طول تونل



مقطع ۵۱ متری طول تونل

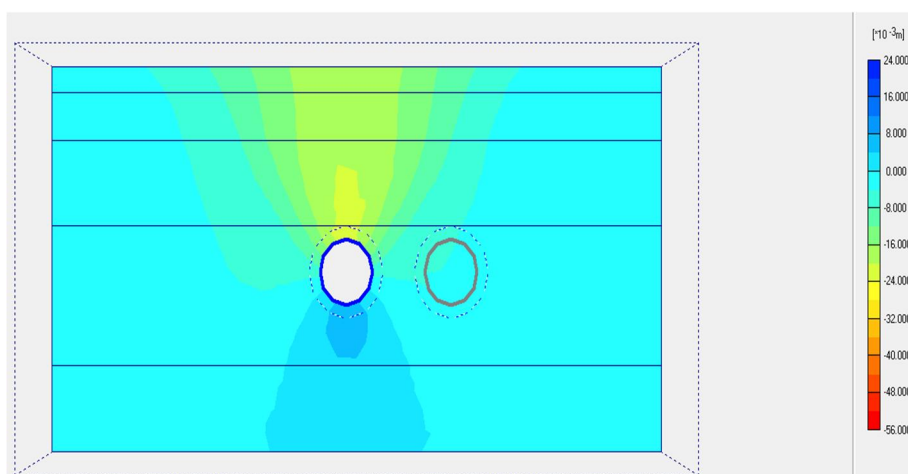
مقطع ۳۶ متری طول تونل



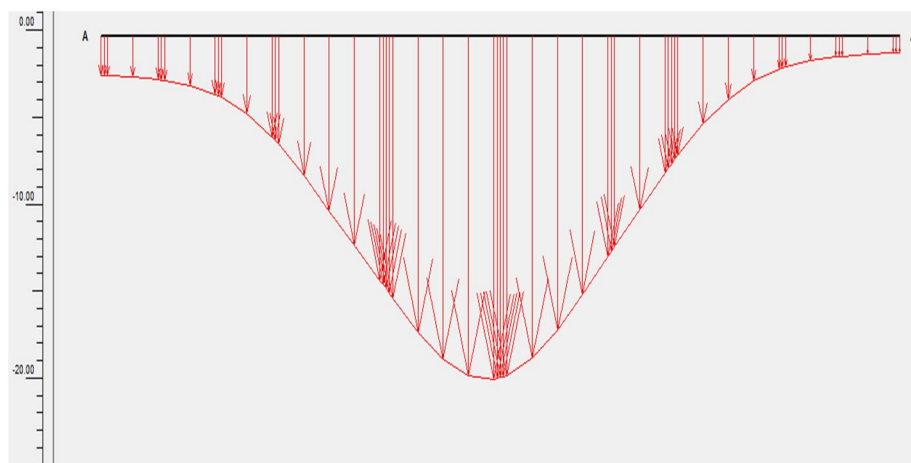
مقطع ۶۹ متری طول تونل

شکل (۷-۴۵): منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۴ در مراحل مختلف حفاری

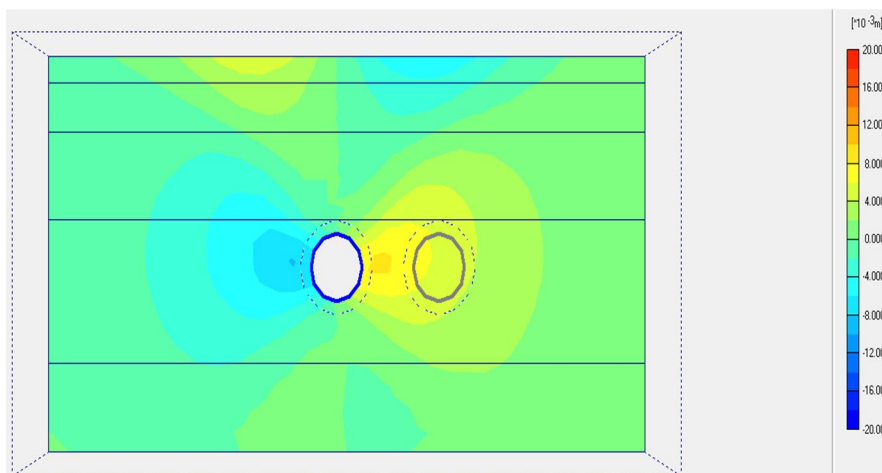
ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول با توجه به شکل (۷-۴۶) حدود ۲۰ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۴۷) پروفیل نشست سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم نشست حدود ۲۰ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۴۸) کنتور جابجایی افقی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی حدود ۸ میلیمتر می‌باشد و در فاصله ۸ متری از محور تونل اتفاق می‌افتد.



شکل (۷-۴۶): کنتور جابجایی قائم مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول

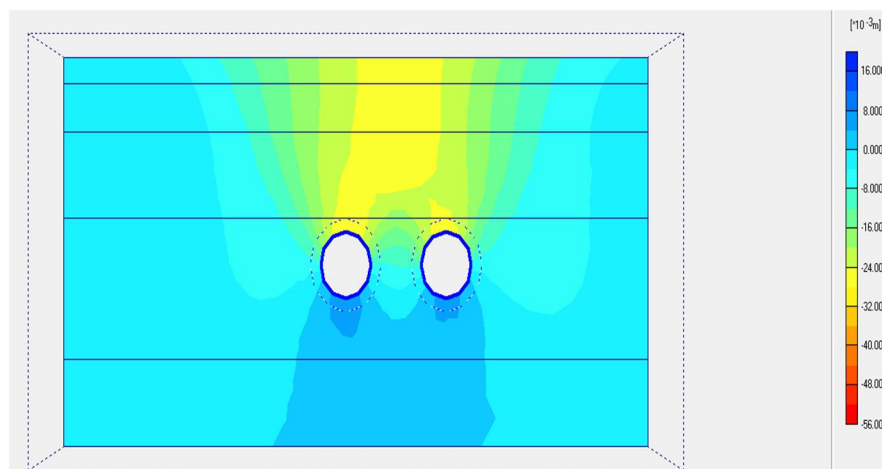


شکل (۷-۴۷): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول

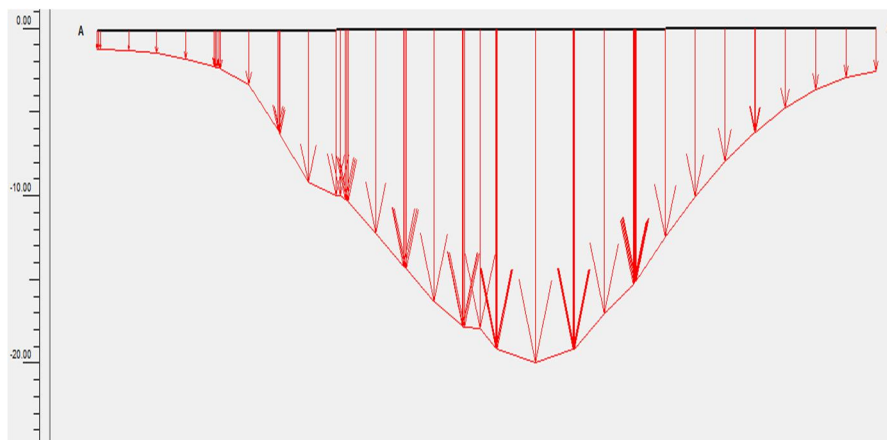


شکل (۷-۴۸) : کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول

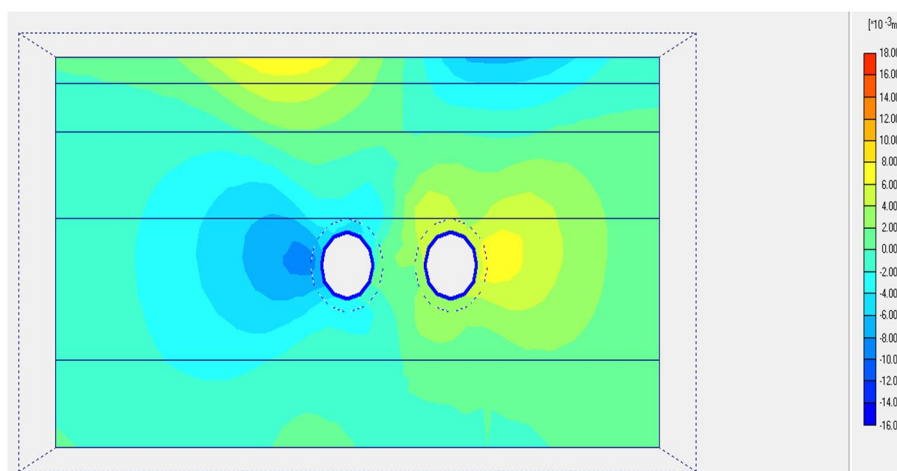
ماکزیمم نشست سطح زمین پس از حفاری تونل دوم با توجه به شکل (۷-۴۹) حدود ۲۴ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۵۰) پروفیل نشست سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم نشست حدود ۲۴ میلیمتر می‌باشد. شکل (۷-۵۱) کنتور جابجایی افقی سطح زمین در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی حدود ۷ میلیمتر می‌باشد و در فاصله ۱۲ متری از مرکز دو تونل اتفاق می‌افتد.



شکل (۷-۴۹) : کنتور جابجایی قائم مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم



شکل (۷-۵۰): پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم



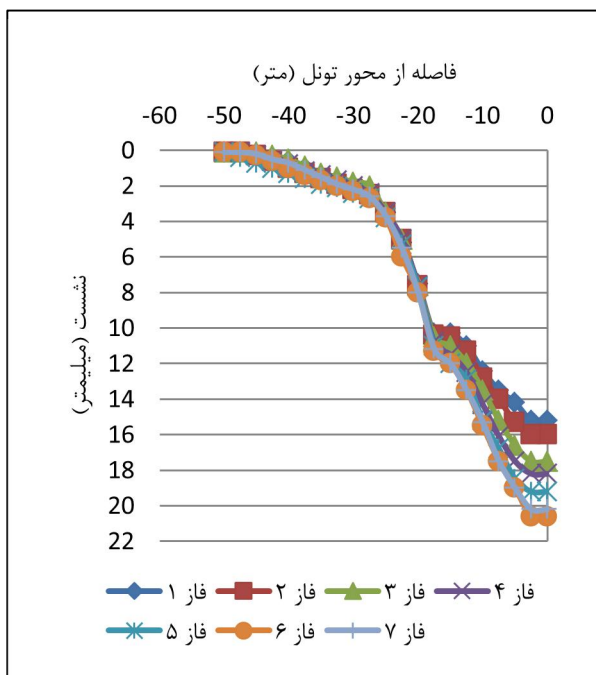
شکل (۷-۵۱): کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم

ب: نشست حاصل از حفاری تونل اول با وجود ساختمان

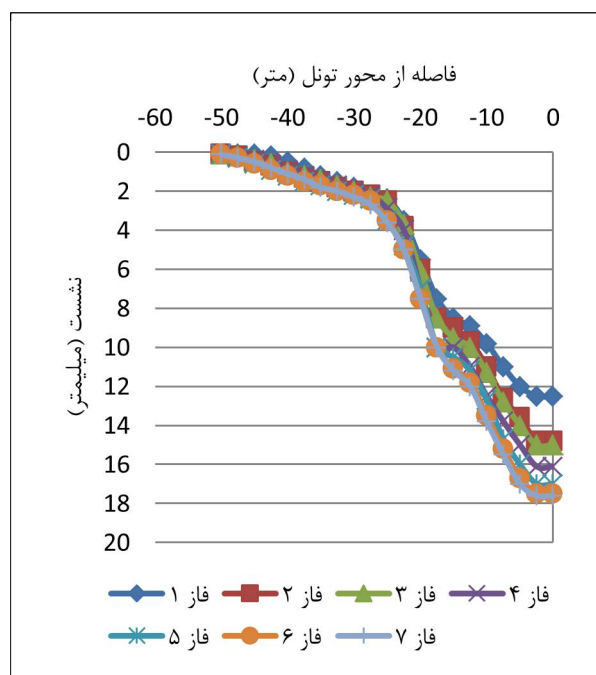
منحنی نشست عرضی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD در مراحل هفت‌گانه حفاری مقطع

تونل، پس از حفر تونل اول برای ساختمان‌های مقطع ۴ در شکل (۷-۵۲) نشان داده شده است. مشابه

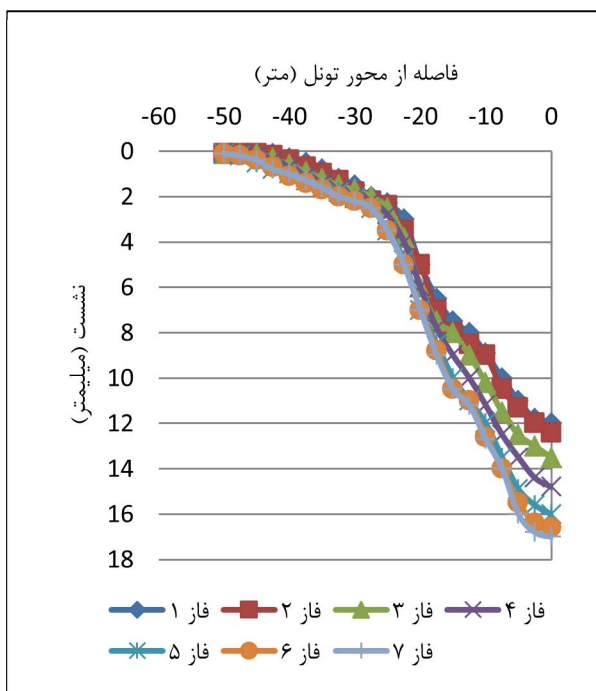
حالت سطح آزاد، نشست در هر فاز بیشتر از فاز قبلی می‌باشد.



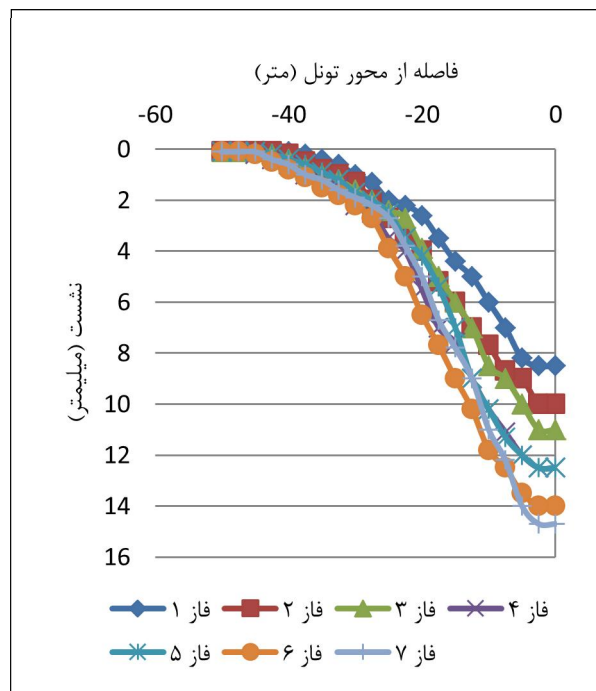
مقطع AB ساختمان ۴۰ و ۴۱ و ۴۲



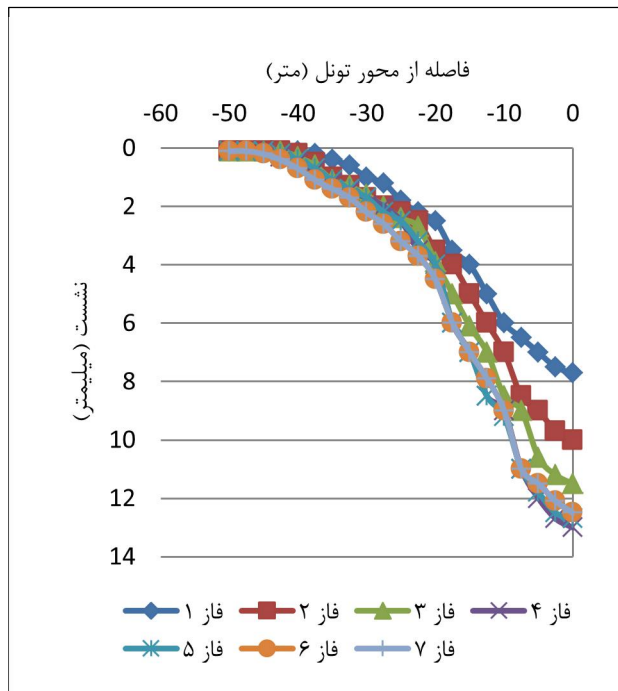
مقطع CD ساختمان ۴۰ و ۴۲



مقطع CD ساختمان ۴۱



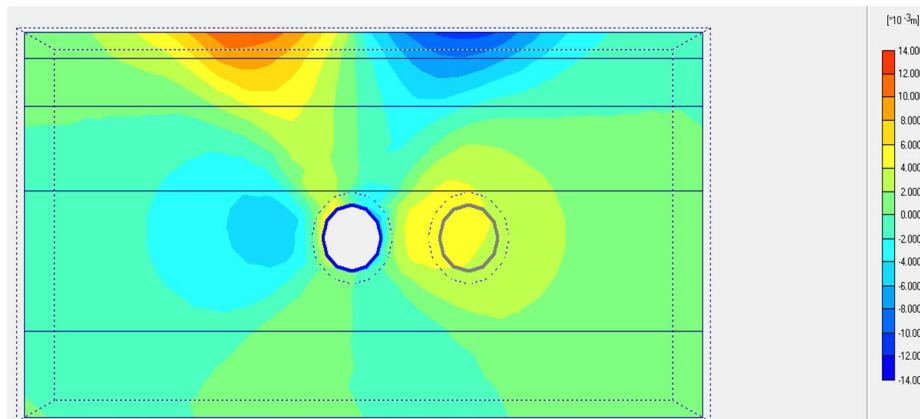
مقطع AB ساختمان ۴۳



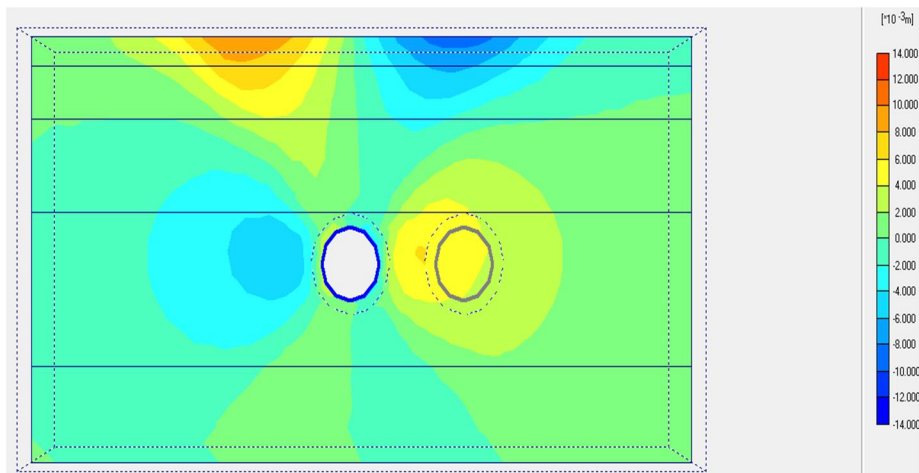
مقطع CD ساختمان ۴۳

شکل (۷-۵۲): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول

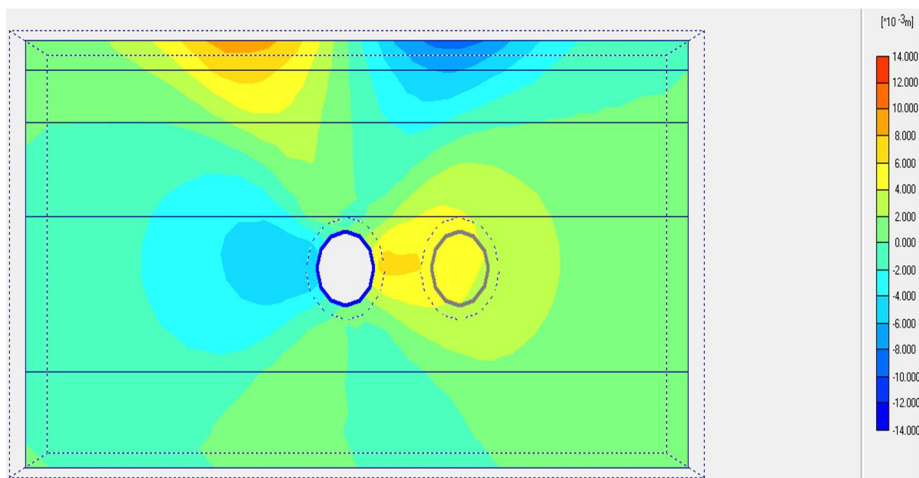
شکل (۷-۵۳) کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در مرحله نهایی در سطح مقطع AB و CD ساختمان‌های مورد مطالعه را پس از حفر تونل اول نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی هر مقطع در جدول (۷-۲۸) آورده شده است.



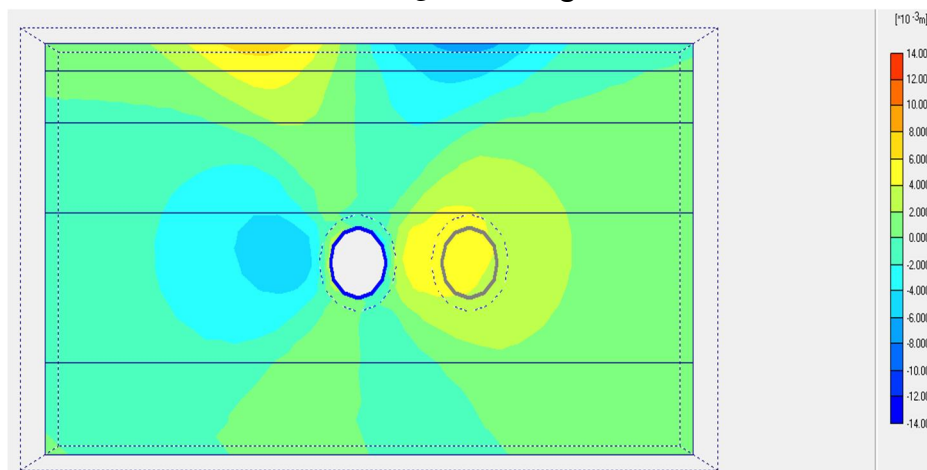
مقطع AB ساختمان‌های ۴۰ و ۴۱ و ۴۲



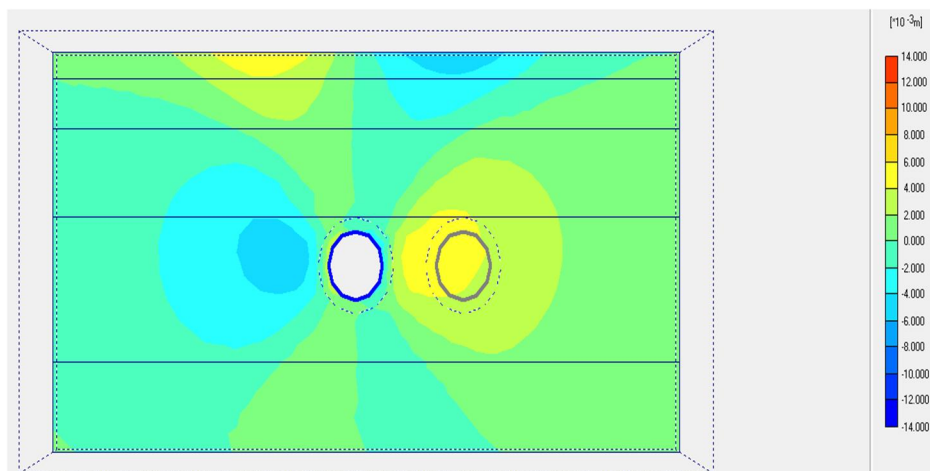
مقطع CD ساختمان های ۴۰ و ۴۲



مقطع CD ساختمان های ۴۱



مقطع AB ساختمان های ۴۳



مقطع CD ساختمان‌های ۴۳

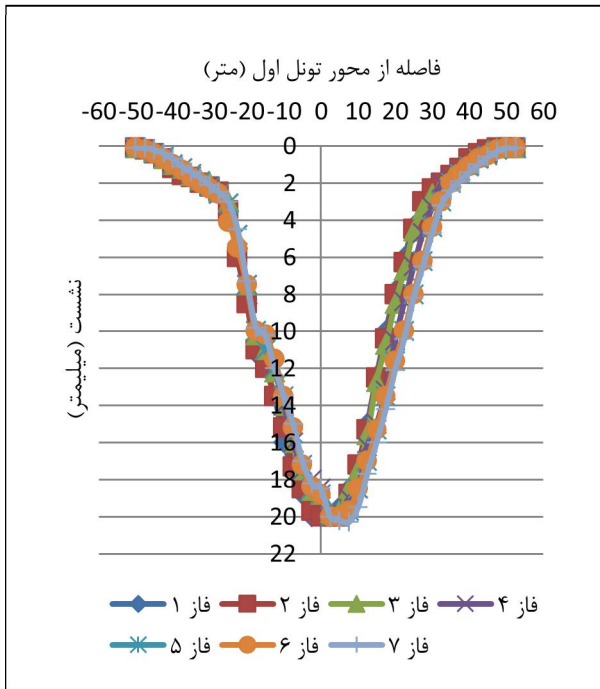
شکل (۷-۵۳): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول

جدول (۷-۲۸): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول

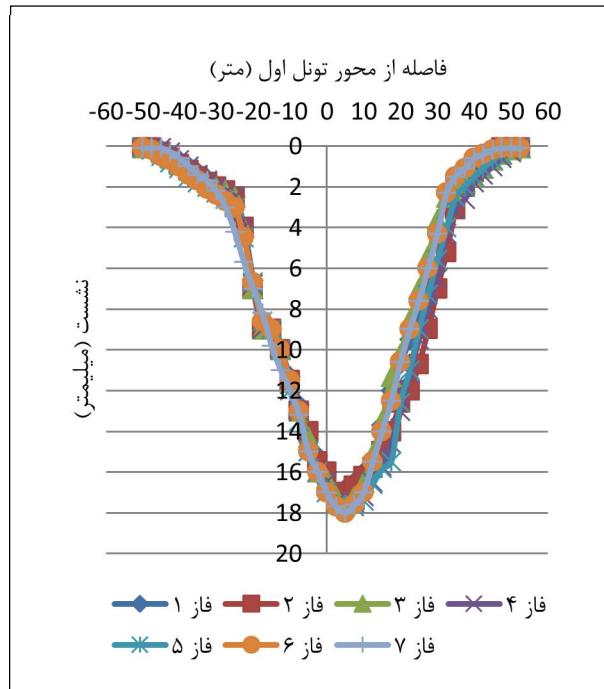
شماره ساختمان	جابجایی افقی سطح مقطع AB (میلیمتر)	جابجایی افقی سطح مقطع CD (میلیمتر)
۴۰	۱۰/۴	۸/۳
۴۱	۱۰/۴	۸/۱
۴۲	۱۰/۴	۸/۳
۴۳	۶/۷	۵/۲

ج: نشست حاصل از حفاری تونل دوم با وجود ساختمان

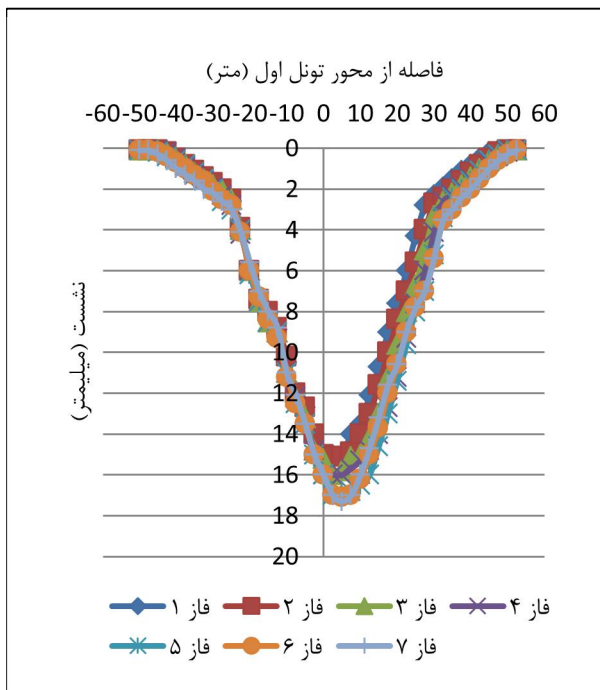
منحنی نشست عرضی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD در مراحل هفت‌گانه حفاری مقطع، پس از حفر تونل دوم برای ساختمان‌های مقطع ۴ در شکل (۷-۵۴) نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌ها، در تمامی مقاطع در همه فازها منحنی نشست به سمت تونل دوم متمایل شده است و نشست در فازهای مختلف حفاری خیلی نزدیک به هم می‌باشد.



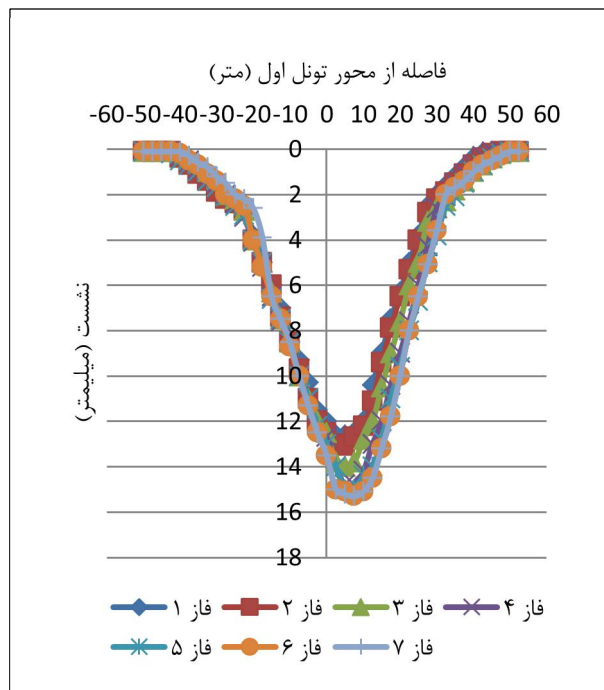
مقطع AB ساختمان ۴۰ و ۴۱ و ۴۲



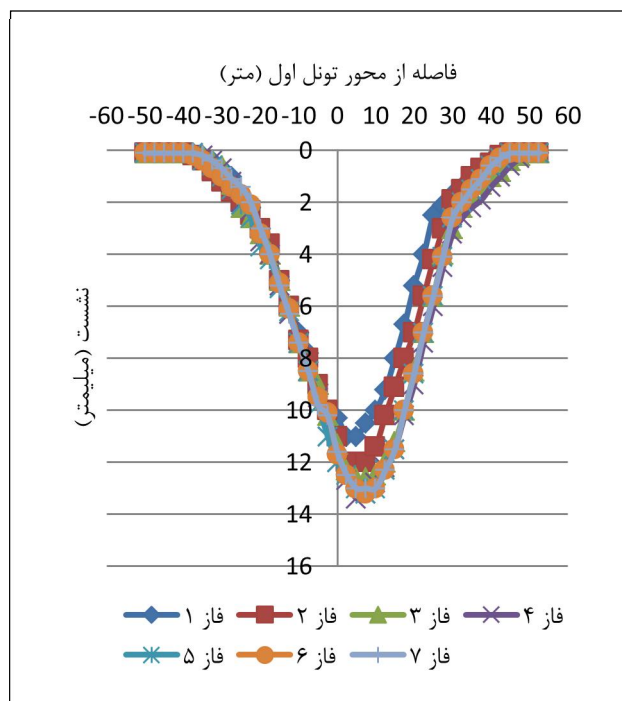
مقطع CD ساختمان ۴۰ و ۴۲



مقطع CD ساختمان ۴۱



مقطع AB ساختمان ۴۳

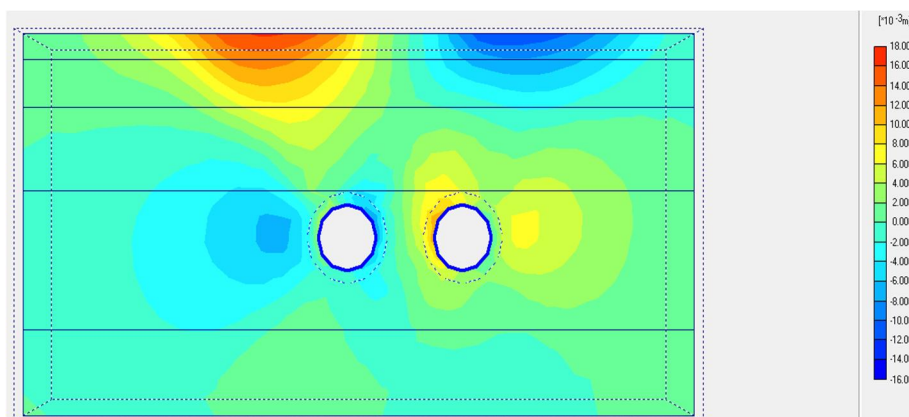


مقطع CD ساختمان ۴۳

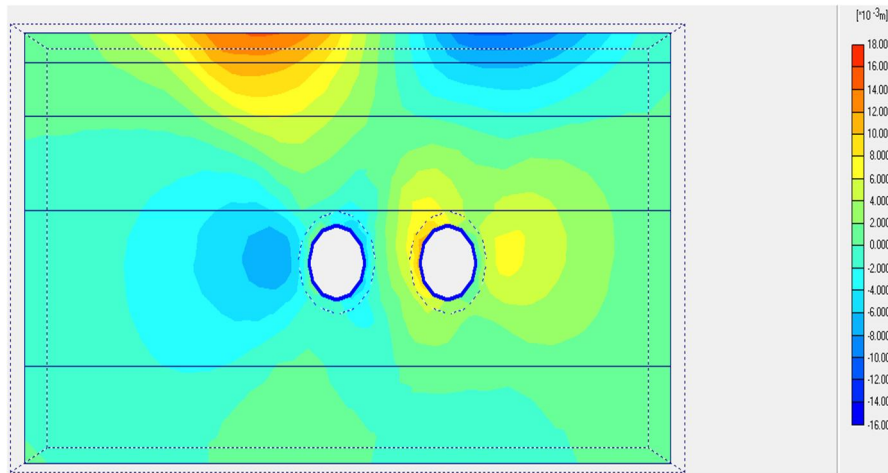
شکل (۷-۵۴): منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم

شکل (۷-۵۵) کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD ساختمان‌های مورد

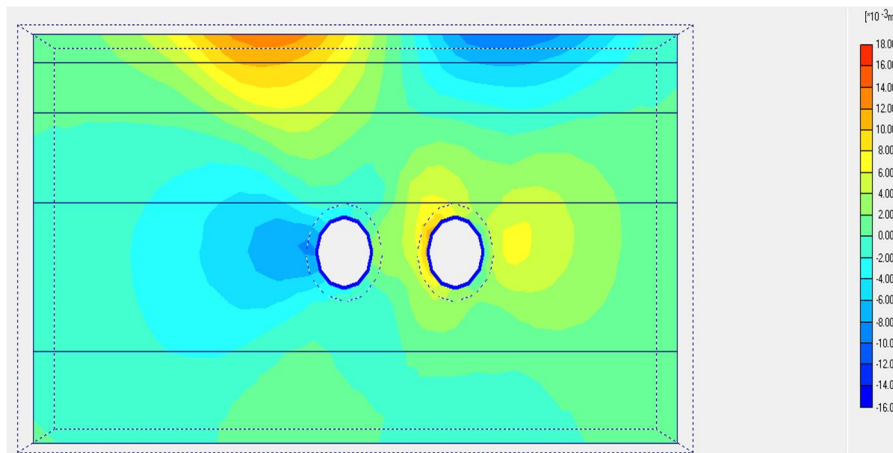
مطالعه را پس از حفر تونل دوم نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی افقی هر مقطع در جدول (۷-۲۹) آورده شده است.



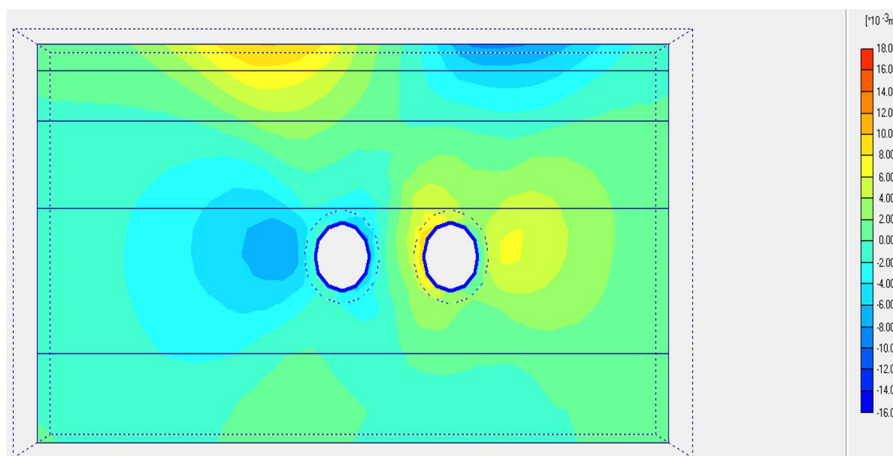
مقطع AB ساختمان ۴۰ و ۴۱ و ۴۲



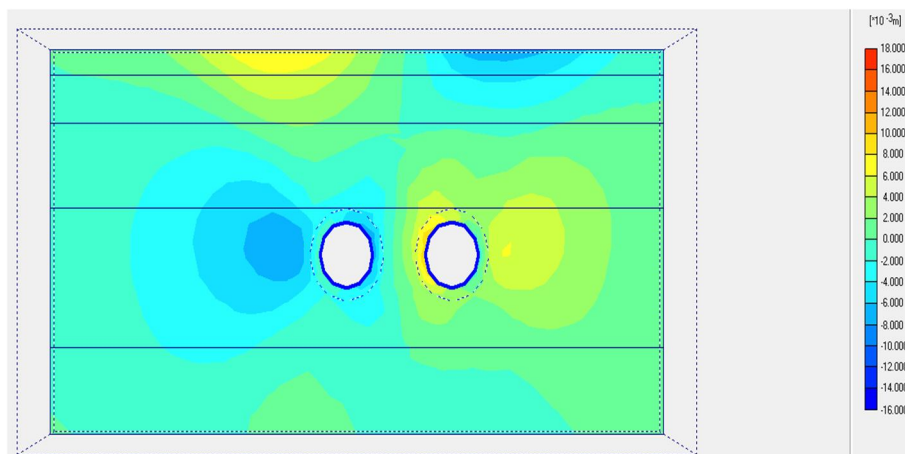
مقطع CD ساختمان ۴۰ و ۴۲



مقطع CD ساختمان ۴۱



مقطع AB ساختمان ۴۳



مقطع CD ساختمان ۴۳

شکل (۷-۵۵): کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم

جدول (۷-۲۹): ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم

شماره ساختمان	جابجایی افقی سطح مقطع AB (میلیمتر)	جابجایی افقی سطح مقطع CD (میلیمتر)
۴۰	۱۴/۲	۱۳
۴۱	۱۴/۲	۱۲/۲
۴۲	۱۴/۲	۱۳
۴۳	۸/۵	۷/۶

د: ارزیابی نتایج نشست ساختمان‌های مقطع ۴

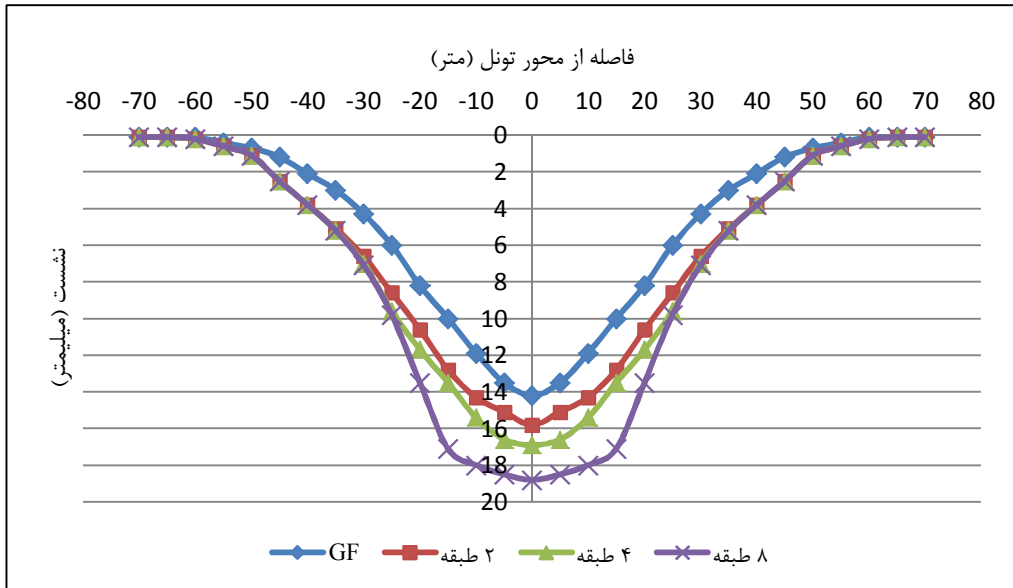
در اینجا از تکرار نتایج نشست در هر فاز خودداری شده و فقط نتایج نشست در فاز نهایی ذکر می‌گردد. میزان نشست در نقاط تعیین شده در زیر پی ساختمان‌ها در جدول (۷-۳۰) درج شده است. همانند ساختمان‌های مقاطع قبل، بیشترین نشست زیر پی در نقاط نزدیک محور تونل و نقاطی که بالای محور تونل قرار دارند و حداقل نشست در نقاط دورتر از محور تونل رخ داده است.

جدول (۷-۳۰): مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۴ (میلیمتر)

ساختمان شماره ۴۰								
پس از حفاری تونل دوم				پس از حفاری تونل اول				
D	C	B	A	D	C	B	A	
۱/۴۰	۲/۰۱	۱/۴۱	۲/۳۲	۰/۸۱	۱/۱۱	۰/۹۱	۱/۳۶	نهایی
ساختمان شماره ۴۱								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۰/۴۱	۰/۶۴	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۰۵۴	۰/۰۶۲	۰/۰۶۹	۰/۰۷۸	نهایی
ساختمان شماره ۴۲								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۲/۲۲	۲/۵۲	۲/۴۹	۲/۹۹	۰/۹۵	۰/۷۲	۱/۲۵	۱/۰۰	نهایی
ساختمان شماره ۴۳								
D	C	B	A	D	C	B	A	
۱/۵۱	۲/۲۱	۱/۸۸	۲/۵۰	۱/۰۰	۰/۷۵	۱/۳۰	۰/۷۸۱	نهایی

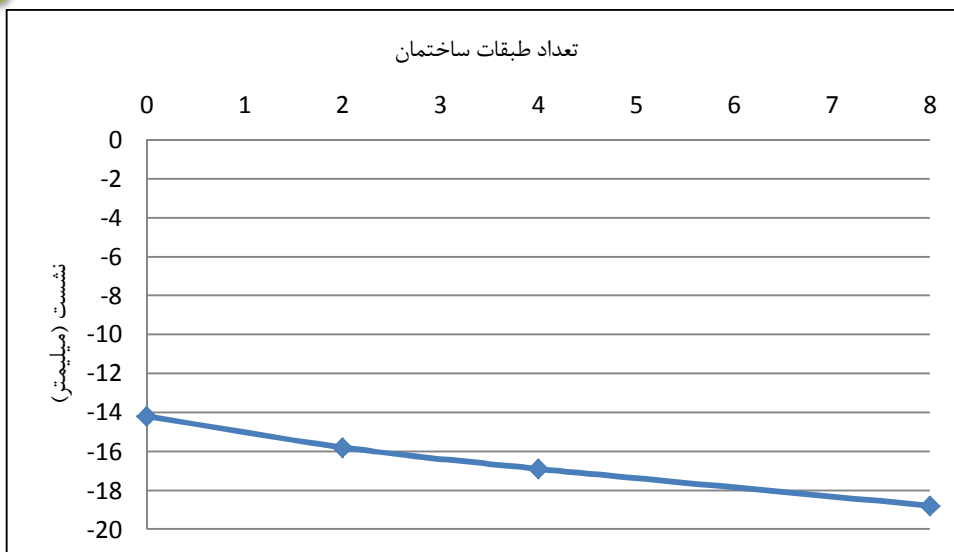
۴-۲-۷ تاثیر وزن ساختمان

در این بخش برای بررسی تاثیر وزن ساختمان بر نشست سطح زمین به تحلیل وجود ۳ ساختمان ۲، ۴ و ۸ طبقه روی محور تونل پرداخته شده است. منحنی‌های نشست عرضی سطحی زمین به ازای حالت سطح آزاد و وجود ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه، برای حالتی که ساختمان دقیقاً بالای محور مرکزی تونل قرار دارد، در شکل (۷-۵۶) ارائه شده‌اند. با افزایش تعداد طبقه ساختمان و بالطبع افزایش وزن ساختمان، نشست در سطح زمین افزایش یافته است. وجود یک ساختمان ۲ طبقه میزان نشست از ۱۴/۲ میلیمتر در حالت سطح آزاد را به ۱۵/۸ میلیمتر رسانده و نشست در ساختمان ۸ طبقه به ۱۸/۸ میلیمتر رسیده، که افزایش ۴/۶ میلیمتری را در پی دارد.



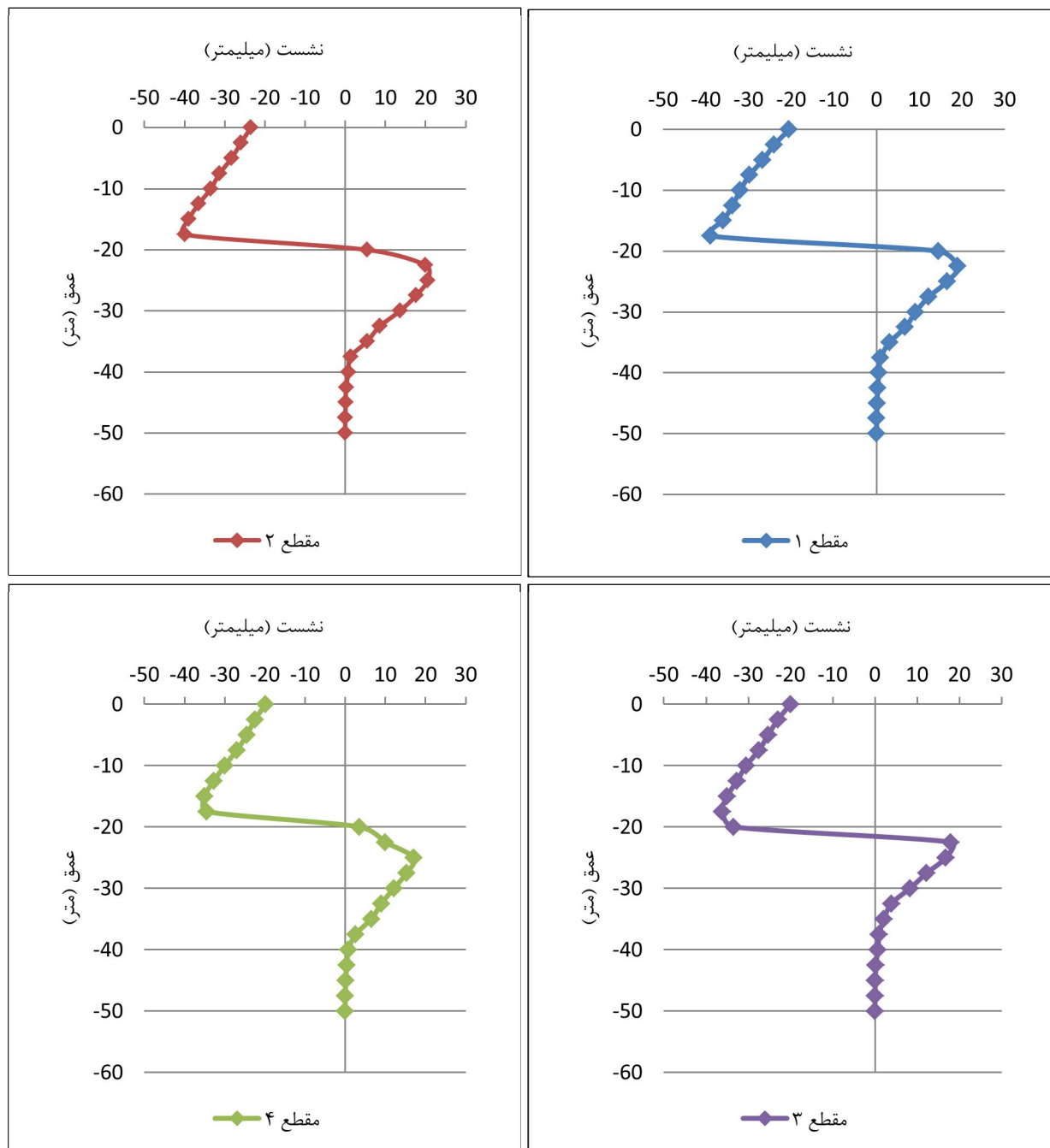
شکل (۷-۵۶): منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین به ازای ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه

منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با طبقات مختلف در شکل (۷-۵۷) نشان داده شده است. شیب منحنی تغییرات نشست به ازای افزایش وزن ساختمان‌ها ثابت می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که به ازای افزایش مقدار ثابتی به وزن سازه، نشست نیز به صورت متناسب با افزایش وزن زیاد می‌گردد. بدین معنی که برای یک ساختمان ۵ طبقه نیز می‌توان از روی این منحنی میزان نشست را پیش‌بینی نمود. نکته اینکه منظور از طبقه صفر همان حالت سطح آزاد (بدون حضور سازه) می‌باشد.



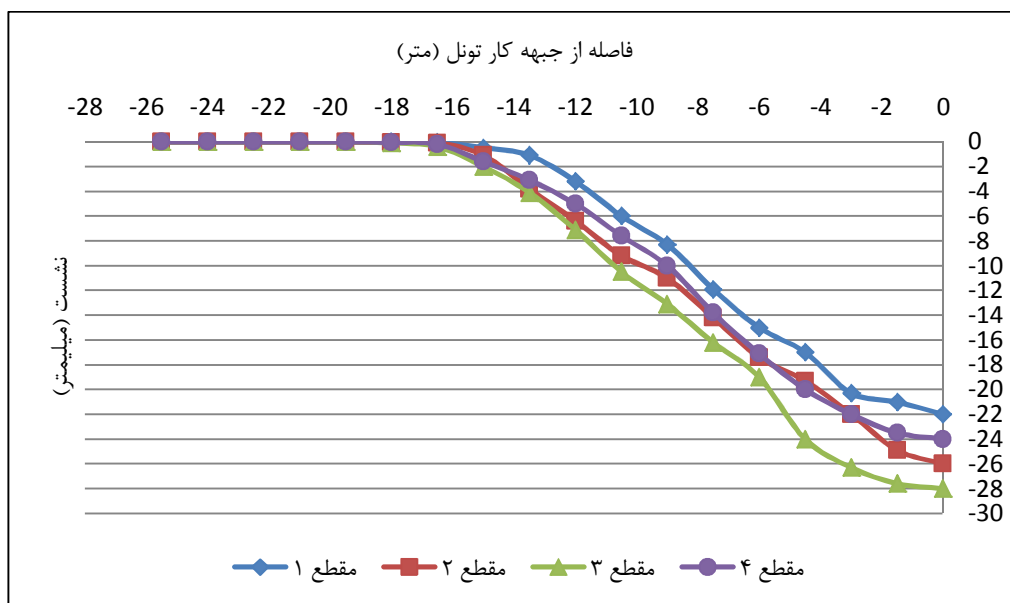
شکل (۷-۵۷): منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با طبقات مختلف در محور مرکزی تونل

منحنی‌های نشست سطح زمین نسبت به عمق پس از حفاری دو تونل برای ۴ مقطع مورد مطالعه در شکل (۷-۵۸) ارائه شده است. همان‌گونه که در این منحنی‌ها دیده می‌شود، از سطح زمین تا عمق مرکز تونل، جابجایی‌ها به صورت نشست بوده و بیشترین میزان نشست برای مقطع ۱ در عمق ۱۷/۵ متری و در دیواره سمت راست تونل اول و برای مقطع ۲ در عمق ۱۷/۵ متری و در دیواره سمت راست تونل دوم و برای مقطع ۳ در عمق ۱۷/۵ متری و در دیواره سمت راست تونل اول و برای مقطع ۴ در عمق ۱۷/۹ متری و در تاج تونل اول اتفاق می‌افتد. از عمق مرکز تونل به پایین جابجایی‌ها به صورت بالا آمدگی نمود پیدا کرده، که حداکثر مقدار آن برای مقطع ۱ در عمق ۲۱/۴ متری و کف تونل اول و برای مقطع ۲ در عمق ۲۳ متری و کف تونل اول و برای مقطع ۳ در عمق ۲۲/۵ متری و کف تونل اول و برای مقطع ۴ در عمق ۲۵ متری و کف تونل اول اتفاق افتاده است. بنابراین نقاط دیواره، تاج و کف تونل بیشترین میزان جابجایی‌ها را در مقاطع مورد بررسی داشته‌اند.



شکل (۷-۵۸): منحنی نشست سطح زمین نسبت به عمق در مقاطع مورد بررسی

منحنی‌های نشست طولی در مقطعی که ماکزیمم نشست رخ می‌دهد در شکل (۷-۵۹) برای ۴ مقطع مورد مطالعه در حالت زمین سطح آزاد نشان داده شده است. همان‌طور که در این منحنی‌ها دیده می‌شود، تقریباً در تمام مقاطع نشست در فاصله ۲/۴D پشت سینه‌کار تونل به حالت ایستا رسیده است.



شکل (۷-۵۹): منحنی نشست طولی در مقاطع مورد بررسی

۳-۷ جمع‌بندی نتایج حاصل از تحلیل عددی مقاطع مورد بررسی

در جدول (۳۱-۷) نتایج نشست حاصل از مدلسازی عددی و نتایج حاصل از رفتارنگاری ساختمان‌ها آورده شده است. با مقایسه نتایج به این واقعیت می‌رسیم که نشست پیش‌بینی شده توسط مدلسازی عددی تطابق خوبی با نتایج رفتارنگاری دارد.

جدول (۳۱-۷): نتایج نهایی ماکزیمم نشست ساختمان‌ها

شماره ساختمان	مدلسازی عددی (میلیمتر)	رفتارنگاری (میلیمتر)
۳	۱۵/۲۶	۱۹
۴	۴/۵۳	۳
۵	۱۳/۶۴	۱۲
۶	۹/۱۳	۸
۲۱	۲/۶۲	۲
۲۲	۳/۷۵	۲
۲۳	۳/۶۶	۲
۳۲	۴/۵۷	۳
۳۳	۲/۲۱	۳
۳۴	۴/۱۲	۲
۴۰	۲/۳۲	۱
۴۱	۰/۸۹	-
۴۲	۲/۹۹	۲
۴۳	۲/۵۰	۱

هر چه ساختمان در فاصله دورتری از محور مرکزی تونل‌ها قرار گرفته باشد، تاثیر مراحل مختلف تونلسازی بر آن کمتر شده و جابجایی‌های عمودی و افقی کمتری در آن ایجاد می‌گردد.

هر چه ساختمان در فاصله نزدیک‌تری نسبت به محور مرکزی تونل قرار داشته باشد، تاثیر مراحل مختلف حفاری بر آن بیشتر شده و جابجایی‌های عمودی بیشتری در آن ایجاد می‌گردد.

اگر از نشست‌های کمتر از ۱ میلیمتر صرف‌نظر گردد، می‌توان فاصله ۴۰ متری از محور مرکزی تونل را به عنوان محدوده تاثیر حفاری تونل در جهت عرضی در سطح زمین در نظر گرفت.

با توجه به تحلیل حساسیت انجام گرفته، در فاصله‌ای حدود ۳D از ابتدا و انتهای ساختمان‌ها تا مرزهای مدل، نشست‌ها به حالت ایستا در آمده است.

بحرانی‌ترین نقاط در زیر پی ساختمان‌ها از نظر حداکثر جابجایی‌های عمودی نقاطی هستند که نزدیک به محور مرکزی تونل می‌باشند.

ساختمان‌هایی که مابین محور مرکزی دو تونل قرار دارند بحرانی‌ترین ساختمان‌ها محسوب شده و میزان نشست پی این ساختمان‌ها در ۴ نقطه نزدیک به هم می‌باشد.

با افزایش تعداد طبقه ساختمان و بالطبع افزایش وزن ساختمان، نشست در سطح زمین افزایش یافته است.

وزن ساختمان تاثیر چندانی در جابجایی‌های افقی سطح زمین نداشته و منحنی‌های جابجایی افقی سطح زمین در ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه تقریبا بر هم منطبق می‌باشند.

شیب منحنی تغییرات نشست به ازای افزایش وزن ساختمان‌ها ثابت بوده، که نشان می‌دهد به ازای افزایش مقدار ثابتی به وزن سازه، نشست نیز به صورت متناسب با آن زیاد می‌گردد.

مطابق شکل (۷-۶۰) در تمام مقاطع حفاری، نشست در فاصله ۲/۴D از پشت جبهه‌کار حفاری به حالت ایستا می‌رسد.

فصل هشتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۸ فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۸-۱ مقدمه

هدف از این تحقیق بررسی مسائل مرتبط با نشست‌ها و جابجایی‌های افقی سطح زمین ناشی از تونلسازی در پروژه خط یک مترو تبریز بوده است. بدین منظور پس از کلاس‌بندی ریسک آسیب‌پذیری سازه‌های ایستگاه ۱۱ تا ۱۲ مترو تبریز و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از قبیل: خصوصیات سازه‌های مورد نظر، پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاکی، خصوصیات هندسی تونل و طراحی روش تحلیل به بررسی و تحلیل در مورد مسائل زیر پرداخته شد:

- تعیین طول مدل بهینه به منظور کمینه کردن نشست در انتهای مدل؛

- ارزیابی تاثیر تونلسازی بر آسیب ساختمان‌ها و تاثیر وجود سازه‌های سطحی بر میزان نشست؛

به منظور تحقیق درباره این مسائل از نرم‌افزار Plaxis 3D Tunnel، که بر اساس روش اجزاء محدود پایه‌گذاری شده است، استفاده گردید.

در این فصل نتایج بدست آمده در تحلیل، به صورت موردی آورده شده و در نهایت نیز بر اساس نتایج

بدست آمده، پیشنهاداتی به منظور ادامه کار ارائه شده است.

۸-۲ نتیجه‌گیری

۱- با توجه به نتایج جدول (۵-۳)، مقاطع ۱، ۲، ۳ و ۴ بر این اساس انتخاب شدند که ساختمان‌های

این مقاطع یا دارای اندیس آسیب‌پذیری بالایی هستند و یا اینکه میزان نشست ثبت شده آن‌ها نسبت به سایر ساختمان‌ها بیشتر است.

۲- با توجه به اینکه پوشش نهایی تونل‌های قطار شهری تبریز از قطعات پیش ساخته بتنی بوده و لنگر خمشی در محل این اتصالات کمتر از پوشش یکپارچه می‌باشد، در این تحقیق از روش ساده‌ای استفاده شده و از رابطه ارائه شده توسط Muir Wood (۱۹۷۲) و تحلیل حساسیت انجام گرفته توسط سالمی برای مدلسازی سیستم نگهداری استفاده شده است.

۳- با توجه به مقادیر نشست پیش‌بینی شده توسط مدل عددی برای مقاطع مختلف داریم:

جدول (۸-۱): نتایج نشست نهایی سطح زمین در حالت سطح آزاد و با وجود ساختمان برای مقاطع مورد بررسی

شماره مقطع	سطح آزاد (میلیمتر)		با وجود ساختمان (میلیمتر)	
	حفر تونل اول	حفر تونل دوم	حفر تونل اول	حفر تونل دوم
۱	۲۰	۲۲	۲۳	۲۵
۲	۲۰	۲۶	۲۲	۲۷
۳	۲۴	۲۸	۲۴/۳	۲۹/۶
۴	۲۰	۲۴	۲۴	۲۶/۴

با توجه به نتایج حاصل از جدول (۸-۱)، وجود ساختمان‌ها باعث افزایش نشست سطح زمین می‌شود. همچنین با توجه به اندیس آسیب‌پذیری محاسبه شده و نتایج نشست بدست آمده از تحلیل عددی، کلاس ریسک آسیب‌پذیری برای ساختمان‌های بحرانی مورد بررسی با توجه به جدول (۸-۲) تعیین شد که با کلاس ریسک آسیب‌پذیری محاسبه شده بر اساس نتایج حاصل از نشست رفتارنگاری برای تمامی ساختمان‌ها مطابقت می‌کند.

جدول (۸-۲): طبقه بندی ساختمان‌ها با استفاده از اندیس آسیب پذیری رانکین و نشست حاصل از تحلیل عددی

کلاس آسیب		نشست ماکزیمم (میلیمتر)	اندیس آسیب پذیری		شماره ساختمان
بلند مدت	کوتاه مدت		بلند مدت	کوتاه مدت	
۲	۲	۱۵/۲۶	۳۴/۵	۳۴/۵	۳
۱	۱	۴/۵۳	۲۸/۵	۲۸/۵	۴
۲	۲	۱۳/۶۴	۳۸	۳۸	۵
۲	۲	۹/۱۳	۳۷	۴۲	۶
۱	۱	۲/۶۲	۳۷	۴۲	۲۱
۱	۱	۳/۷۵	۳۲	۳۲	۲۲
۱	۱	۳/۶۶	۶۰	۶۰	۲۳
۱	۱	۴/۵۷	۸۸/۵	۸۸/۵	۳۲
۱	۱	۲/۲۱	۸۳	۸۳	۳۳
۱	۱	۴/۱۲	۵۱	۵۱	۳۴
۱	۱	۲/۳۲	۵۳	۵۳	۴۰
۱	۱	۰/۸۹	۵۲/۵	۵۲/۵	۴۱
۱	۱	۲/۹۹	۷۰	۷۰	۴۲
۱	۱	۲/۵۰	۸۷	۸۷	۴۳

۴- اگر از نشست‌های کمتر از ۱ میلیمتر صرف نظر گردد، می‌توان فاصله ۴۰ متری از محور مرکزی

تونل را به عنوان محدوده تاثیر حفاری تونل در جهت عرضی در سطح زمین در نظر گرفت.

- ۵- در تمامی مقاطع وجود ساختمان‌ها باعث افزایش جابجایی عمودی و افقی نسبت به حالت سطح آزاد شده است.
- ۶- به طور کلی بحرانی‌ترین نقاط زیر پی ساختمان‌ها از نظر حداکثر جابجایی‌های عمودی، نقاطی هستند که نزدیک محور مرکزی دو تونل قرار دارند.
- ۷- ساختمان‌هایی که مابین محور مرکزی دو تونل قرار دارند بحرانی‌ترین ساختمان‌ها محسوب شده و میزان نشست پی این ساختمان‌ها در ۴ نقطه نزدیک به هم می‌باشد.
- ۸- در جهت طولی نشست در فاصله $2/4D$ از پشت جبهه کار حفاری به حالت ایستا می‌رسد.
- ۹- در اثر حفر تونل دوم، منحنی نشست در سمت چپ تونل اول تقریباً ثابت باقی می‌ماند، ولی طرف راست منحنی نشست به سمت تونل دوم متمایل شده و ماکزیمم نشست مابین دو تونل و نزدیک تونل اول اتفاق می‌افتد.
- ۱۰- نتایج به دست آمده از تحلیل ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه که روی محور تونل قرار گرفته‌اند نشان داد که وجود یک ساختمان ۲ طبقه میزان نشست از $14/2$ میلیمتر در حالت سطح آزاد را به $15/8$ میلیمتر رسانده و نشست در ساختمان ۸ طبقه به $18/8$ میلیمتر رسیده، که افزایش $4/6$ میلیمتری را در پی دارد.
- ۱۱- از سطح زمین تا عمق مرکز تونل، جابجایی‌ها به صورت نشست بوده و بیشترین میزان نشست برای مقطع ۱ در عمق $17/5$ متری و در دیواره سمت راست تونل اول و برای مقطع ۲ در عمق $17/5$ متری و در دیواره سمت راست تونل دوم و برای مقطع ۳ در عمق $17/5$ متری و در دیواره سمت راست تونل اول و برای مقطع ۴ در عمق $17/9$ متری و در تاج تونل اول اتفاق می‌افتد. از عمق مرکز تونل به پایین جابجایی‌ها به صورت بالا آمدگی نمود پیدا کرده، که حداکثر مقدار آن برای مقطع ۱ در عمق $21/4$ متری و کف تونل اول و برای مقطع ۲ در عمق 23 متری و کف تونل اول و برای مقطع ۳ در عمق $22/5$

متری و کف تونل اول و برای مقطع ۴ در عمق ۲۵ متری و کف تونل اول اتفاق افتاده است. بنابراین نقاط دیواره، تاج و کف تونل بیشترین میزان جابجایی‌ها را در مقاطع مورد بررسی داشته‌اند.

۱۲- با توجه به مقایسه روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی برای پیش‌بینی نشست، رابطه تجربی آقای پک و رابطه تحلیلی آقای لاگاناتان و پولوس با نتایج حاصل از مدل عددی تطابق خوبی دارد.

۳-۸ پیشنهادات

۱- در بررسی نشست‌های حاصل از تونلسازی، باید به نقاط عطف منحنی‌های نشست توجه بسیار نمود، بدین معنی که در صورت احتمال استقرار سازه‌های سطحی بر روی نقاط عطف باید با تمهیداتی، زمین را تقویت نمود تا منحنی نشست آن تغییر یابد.

۲- ساختمان‌های بررسی شده در این تحقیق، سازه‌های سطحی می‌باشند. پیشنهاد می‌گردد در مقوله سازه‌های زیر سطحی نیز مطالعاتی انجام شود.

۳- ساختمان‌ها دارای پی‌های سطحی، نیمه عمیق و عمیق می‌باشند. در این تحلیل پی ساختمان‌های سطحی در نظر گرفته شد. پیشنهاد می‌گردد برای ادامه مطالعات به بررسی تاثیر عمق پی ساختمان‌ها بر میزان نشست در سطح زمین پرداخته شود.

۴- بررسی و مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق، با نتایج حاصل از نرم‌افزارهای دیگر برای کنترل صحت یافته‌ها بسیار مناسب می‌باشد.

۵- در این تحقیق رفتار ساختمان در نظر گرفته نشد، پیشنهاد می‌شود در تحقیق‌های آتی برای بررسی بیشتر تاثیر خصوصیات خود ساختمان بر روی نشست رفتار غیر خطی ساختمان نیز در نظر گرفته شود.

۶- پیشنهاد می‌شود به منظور تاثیر هندسه ساختمان‌ها بر روی منحنی‌های نشست سطح زمین، طول و عرض‌های متفاوتی از ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- [1] Hoek,E.,”**Numerical Modeling for shallow tunnels in weak rock**”,April 2004, Discussion paper 3: p.1-4
- [2] Report, I.A.,” **Settlement induced by tunneling in soft ground**”,Tunneling & Underground Space Technology 22(2007), p. 119-149
- [3] Vittorio,G.,”**Mechanized tunneling in urban areas:Design methodology & construction control**”,Taylor and Francis Group 2007,p.113-150
- [4] شریف زاده مصطفی، خادمی حمیدی جعفر، ترکمنی قطب احمد، تونلسازی مکانیزه سپری، جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۲۳ دی ماه ۱۳۸۶.
- [5] Hetrog,I.R.W.d.,”**An assessment of the influence on the adjacent structures due to tunneling underneath the Chahar Bagh Abbasi street in Esfahan,Iran**”,MSc thesis
- [6] Suwansawat,S.,”**Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok:Ground Response and Prediction of surface Settlement Using Artificial Neural Network**”,PHD thesis,MIT university,2002,p.76-149
- [7] Franzius, J.N.,”**Behavior of building due to tunnel induced settlement** “.PHD thesis,Imperial College of Science,Technology and Medicine,2003
- [8] Sweeney,P.,”**A study of interaction effects due to bored tunnes in clay**”,PHD thesis,Massachusetts Institute of Technology,2006
- [9] M,M.e.,”**Comparison of analytical method,3D FEM with experimental Subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground**”,Computers and Geotechnics,2009,p.113-124
- [10] L.A.Strokova.,”**Method of estimating surface settlement during driving of urban tunnels**”,Soil Mechanics and Foundation Engineering,2010,p.92-95
- [11] S.G.Ercelebi.H.copur.I.Ocak.,”**Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM**”,Environ Earth Sci,2010
- [12] A.B.,”**Analytical solution for shallow tunnels in saturated ground**”,Jour of Eng.Mech.ASCE 2001
- [13] Sven,M.,”**Tunnel induced settlement and structural forces in lining**”,Athesis submitted for PHD degree, Stuttgart university,2005
- [14] S.C.Mollar,P.A.V.,”**On numerical simulation of tunnel installation**”,Tunneling & Underground Space Technology 23(2008) 2007,p.461-475

- [15] K.M.Neaupance,N.R.Adhokari.,”**Prediction of tunneling-induced ground movement with the multi-layer perceptron**”.Jornal of Tunneling and Underground Space Technology;21(2006),p.151-159
- [16] Alan Graham Bloodworth.,”**Three-Dimensional Analysis of tunneling effects on structures to develop design methods**”,PHD thesis,Oxford University,2002
- [17] رهایی علیرضا، اصول مهندسی پی، ویرایش اول. ۱۳۷۷.
- [18] اردشیر اطمیابی ۱۳۷۹، تحلیل و طراحی پی- ویرایش پنجم، انتشارات جویبار.
- [19] اتحادیه شرکت‌های قطار شهری، خبرنامه اتحادیه شرکت‌های قطار شهری، شماره ۸، ۱۳۸۶.
- [20] شرکت شهمی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی، مطالعات مترو تبریز، ۱۳۸۴.
- [21] سازمان قطار شهری تبریز، گزارش نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی خط یک قطار شهری تبریز، ۱۳۸۴
- [22] شرکت مهندسین مشاور جهاد تحقیقات سهند، مطالعات ژئوتکنیک قطار شهری تبریز، محدوده خیابان تیمسار محقق
- [23] شرکت مهندسین مشاور گنو، گزارش مطالعات ژئوتکنیک خط یک قطار شهری تبریز، ۱۳۸۷
- [24] شهرداری منطقه یک و منطقه دو تبریز، اطلاعات بایگانی شده مربوط به ساختمان‌های مورد نظر، ۱۳۹۰
- [25] G.Strang,”**Linear Algebra and Its Application**”,4th edition,Brooks Cols,2005.
- [26] R.B.J.Brinkgreve & P.A.Vermer,PLAXIS 3D TUNNEL user manual, TOKYO. A.A.Balkema,2001.
- [27] Australian Standard (2002).,.”**Earth Retaining Structures**”,Standards Australia.
- [28] Muir Wood,A.AM.,”**The circular tunnel in elastic ground**”,proc. Int Symp Underground Openings,Lucerne,1972,p.356-369
- [29] سالمی،اکبر، ۱۳۸۷، پایان‌نامه ارشد: "تحلیل دینامیکی تونل‌های دوقلوی خط یک متروی تبریز"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [30] Celetino,T.B.,GOMES,R and Bortolucci,A.A.,”**Errors in Ground Distortions due to settlement trough Adjustment**”,Tunneling and underground space Technology 15(1) 2000,p.97-100
- [31] حسینی، س، "شبیه‌سازی سه بعدی از پروسه حفاری توسط TBM در زمین‌های نرم (مطالعه موردی خط ۳ مترو تهران)". نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، آبان ماه ۱۳۹۰، تهران.

پیوست

مشخصات ساختمان‌های محدوده مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات ساختمان‌های واقع در محدوده مورد بررسی

شماره ساختمان	نوع ملک	عمر سازه (سال)	تعداد طبقات	ابعاد (متر)	نوع اسکلت	روباره (متر)	توضیحات
۱	تجاری-اداری	۲۵	۲	۱۰×۱۶	بتنی	۱۴/۳	-
۲	تجاری	۲۵	۱	۶×۱۰	بتنی	۱۴/۳	-
۷	مسکونی	۸	۲	۷×۱۳	فلزی	۱۴/۸	-
۸	مسکونی	۱	۵	۱۲×۲۵	بتنی	۱۵/۲	در حال ساخت
۹	مسکونی	۱۰	۲	۱۰×۱۳	بتنی	۱۵/۳	-
۱۰	مسکونی	۶۰	۱	۷×۱۸	چوبی	۱۵/۱	خالی از سکنه
۱۱	مسکونی	۱۵	۲	۷×۱۲	فلزی	۱۵/۳	-
۱۲	مسکونی	۲۵	۲	۸×۱۰	فلزی	۱۵/۶	-
۱۳	مسکونی	۸۰	۱	۱۰×۱۴	چوبی	۱۵/۶	خالی از سکنه-ریزشی
۱۴	مسکونی	۱۰۰	۲	۱۰×۲۲	چوبی	۱۵/۸	خالی از سکنه-ریزشی
۱۵	باغ					۱۵/۸	-
۱۶	مسکونی	۳۰	۲	۱۰×۱۰	فلزی	۱۵/۹	-
۱۷	مسکونی	۳۰	۲	۶×۱۰	فلزی	۱۶	-
۱۸	مسکونی	۵۰	۱	۶×۱۶	چوبی	۱۶/۲	خالی از سکنه
۱۹	باغ					۱۶/۳	-
۲۰	مسکونی	۸۰	۱	۸×۱۲	چوبی	۱۶/۴	خالی از سکنه
۲۴	خیابان تربیت					۱۶/۸	-
۲۵	تجاری-تولیدی	۵۰	۲	۱۵×۱۵	حمل چوبی	۱۶/۹	-
۲۶	تجاری-تولیدی	۵۰	۲	۸×۱۵	حمل چوبی	۱۶/۹	-
۲۷	مسکونی	۳۵	۲	۱۰×۱۴	فلزی	۱۶/۸	-
۲۸	مسکونی	۳۵	۲	۱۰×۱۲	فلزی	۱۶	-
۲۹	مسکونی	۳۰	۲	۱۲×۱۲	فلزی	۱۶	-
۳۰	مسکونی	۳۰	۲	۱۰×۱۸	فلزی	۱۵	-
۳۱	عمومی	۱۰۰	۱	۸×۸	حمل قوسی	۱۵/۲	مسجد میراث فرهنگی
۳۵	مسکونی	۵۰	۲	۱۰×۱۰	حمل	۱۶/۷	-
۳۶	مسکونی	۵۰	۲	۸×۱۲	حمل	۱۷	-
۳۷	مسکونی	۶۰	۱	۸×۱۰	حمل	۱۷/۵	-

ادامه جدول ۱

توضیحات	روباره (متر)	نوع اسکلت	ابعاد (متر)	تعداد طبقات	عمر سازه (سال)	نوع ملک	شماره ساختمان
-	۱۷/۷	حمال	۸×۱۲	۱	۶۰	مسکونی	۳۸
بازسازی شده	۱۷/۸	حمال فلزی	۲۰×۲۲	۱	۵۰	مسکونی	۳۹
دفتر مسافر خانه	۱۹/۱	فلزی	۸×۱۲	۱	۲۰	خدماتی	۴۴
میراث فرهنگی	۱۹/۴	سنگی	۱۶×۲۴	۲	۱۰۰	تجاری	۴۵
-	۱۹/۶	حمال	۸×۱۶	۱	۳۵	تجاری	۴۶
-	۱۹/۷	حمال	۸×۸	۱	۳۵	تجاری	۴۷
-	۱۹/۹	فلزی	۸×۱۲	۱	۳۰	تجاری	۴۸
-	۲۰	فلزی	۸×۸	۱	۳۰	تجاری	۴۹
-	۲۰	فلزی	۸×۱۲	۱	۳۰	تجاری	۵۰

طبقه‌بندی ساختمان‌های محدوده مورد مطالعه

جدول ۲- طبقه‌بندی ساختمان‌ها با استفاده از اندیس آسیب‌پذیری رانکین

کلاس آسیب		نشست ماکزیمم (میلیمتر)	اندیس آسیب‌پذیری		شماره ساختمان
بلند مدت	کوتاه مدت		بلند مدت	کوتاه مدت	
۱	۱	۵	۴۰	۴۰	۱
-	-	-	۴۸/۵	۴۳/۵	۲
-	-	-	۴۱	۴۱	۷
۲	۲	۱۰	۳۶	۳۸	۸
-	-	-	۴۴	۴۴	۹
-	-	-	۵۴	۵۴	۱۰
۱	۱	۴	۳۸/۵	۳۸/۵	۱۱
۱	۱	۱	۴۳	۴۳	۱۲
-	-	-	۵۲	۵۲	۱۳
۱	۱	۵	۵۶	۶۱	۱۴
-	-	-	-	-	۱۵
۱	۱	۳	۴۱	۴۱	۱۶
۱	۱	۰	۴۱	۴۱	۱۷
۱	۱	۱	۵۲	۴۷	۱۸
-	-	-	-	-	۱۹
-	-	-	۶۰	۶۰	۲۰
-	-	-	-	-	۲۴
۱	۱	۳	۵۱/۵	۵۱/۵	۲۵
۱	۱	۱	۵۶	۵۶	۲۶

ادامه جدول ۲

۱	۱	۲	۳۳	۳۳	۲۷
۱	۱	۳	۴۵	۴۵	۲۸
۱	۱	۰	۴۵	۴۵	۲۹
۱	۱	۱	۳۲	۳۲	۳۰
۱	۱	۱	۸۵	۸۵	۳۱
-	-	-	۵۶	۵۶	۳۵
-	-	-	۵۶	۵۶	۳۶
۱	۱	۱	۵۶	۵۶	۳۷
۱	۱	۱	۵۶	۵۶	۳۸
۱	۱	۰	۴۰	۴۷	۳۹
۱	۱	۱	۳۷	۳۷	۴۴
۱	۱	۱	۶۸	۶۸	۴۵
۱	۱	۰	۴۳	۴۳	۴۶
۱	۱	۱	۴۸	۴۸	۴۷
-	-	-	۴۵	۴۵	۴۸
۱	۱	۱	۴۵	۴۵	۴۹
۱	۱	۰	۴۵	۴۵	۵۰

Abstract

Nowadays in big cities, subways and urban tunnels are considered as one of most important substructures of urban transportation network. The more crowded the urban environment and limited the surface space, the more required the need to make substructure constructions such as tunnels to secure. Since new tunnel projects should be constructed beneath urban crowded areas, construction and implementation of these underground systems may cause damages to installations and surface and subsurface constructions. The main purpose of this research is numerical modeling of settlement of buildings above Tabriz subway line 1 due to full face excavation by EPB machine. To do so, at first, results from monitoring of buildings located between stations 11 and 12 of Tabriz subway line 1 that had been done by survey, were categorized and final displacement of buildings were achieved. Buildings of this area have been classified by use of Rankin vulnerability index and final monitoring results and it was shown that buildings No. 3, 4, 5, 6, 20, 21, 22, 23, 32, 33, 34, 40, 41, 42, 43 are subject to more damages rather than other buildings. To research more, 3dimensional numerical modeling by Plaxis 3D Tunnel software has been used to study these critical sections. For precise determination of buildings settlement curves, sensitivity analysis has been done in longitudinal strike of model and according to the results of sensitivity analysis, it was determined that settlements reach to static mode in distance of 3D from start and end of building to model boundary. Then by use of this optimized model, ground surface and buildings settlement in 7 phase when crossing of excavation machine under or beside the building and 1 final phase when the last segment installed in distance of 3D from end of the building has been evaluated and finally results from numerical modeling and real results have been compared. This comparison show that values from numerical modeling located in range of monitoring results of buildings. Also influence range of tunnel excavation in all sections in cross sectional strike is to 40 meters from main tunnel axis and the more far the buildings from tunnel center axis, the less effective from different stages of tunneling.

Keywords: Tabriz subway line 1, EPB, Settlement, Vulnerability Index (I_v), Sensitivity Analysis, Numerical Modeling.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**Numerical modeling of settlement of surface structures due to excavation
of twin tunnels of Tabriz subway – line 1**

Hamed Karimnia

Supervisors

Dr. Hossein Mirzaie Nasirabad

Dr. Shokrollah Zare

Advisor

Fariborz Salehi Ali

Mohammad Reza Bitarafan

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in
Mining engineering**

September 2012

