





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

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

بسمه تعالی

فرم شماره (۶)

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 کریم نیا رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان "مدلسازی عددی نشست سازه های سطحی تحت تاثیر حفاری تونل های دوقلوی خط ۱ متروی تبریز" که در تاریخ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

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

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
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 تکیه گاه 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 شکرآ... 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

۱-۱-۱-۲ شرایط زمین شناسی..... ۸

۲-۱-۱-۲ روش حفاری..... ۹

۳-۱-۱-۲ عمق تونل..... ۹

۴-۱-۱-۲ ابعاد فضای حفاری..... ۱۰

۵-۱-۱-۲ میدان تنش..... ۱۱

۲-۱-۲ 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	..... ۳-۱-۳-۲ روش اوتنو (۱۹۷۹)
۲۳	..... ۴-۱-۳-۲ روش میر و تیلور (۱۹۸۲)
۲۴	..... ۵-۱-۳-۲ روش هرزوغ (۱۹۸۵)
۲۴	..... ۲-۳-۲ روش‌های تحلیلی
۲۴	..... ۱-۲-۳-۲ روش ساگاستا و گونزالس
۲۴	..... ۲-۲-۳-۲ روش ورویوجیت و بوکر (۱۹۹۶)
۲۵	..... ۳-۲-۳-۲ روش لاگاناتان و پولوس (۱۹۹۸)
۲۶	..... ۳-۳-۲ مدلسازی فیزیکی
۲۷	..... ۴-۳-۲ روش‌های عددی
۲۷	..... ۱-۴-۳-۲ تحلیل‌های دو بعدی
۳۰	..... ۲-۴-۳-۲ تحلیل‌های سه بعدی
۳۲	..... ۵-۳-۲ تحلیل شبکه عصبی
۳۴	..... ۴-۲ نتیجه‌گیری
۳۷	..... فصل سوم: ارزیابی آسیب وارد بر سازه‌ها در اثر نشست سطح زمین
۳۸	..... ۱-۳ مقدمه
۳۸	..... ۲-۳ پیش‌بینی آسیب وارد بر سازه‌ها
۳۹	..... ۳-۳ بررسی آسیب وارد بر سازه‌ها
۳۹	..... ۱-۳-۳ فرایند ارزیابی ریسک آسیب برای ساختمان‌ها
۴۳	..... ۲-۳-۳ طبقه‌بندی ساختمان‌ها
۴۳	..... ۱-۲-۳-۳ روش اندیس آسیب‌پذیری
۴۷	..... ۳-۳-۳ حداکثر نشست مجاز سازه‌ها
۴۹	..... ۴-۳-۳ روش‌های کاهش نشست ساختمان‌ها
۵۲	..... ۴-۳ 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): فلوچارت 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 (۲۶-۷) : پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۲۷

شکل (۲۷-۷) : کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۲۷

شکل (۲۸-۷) : منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول..... ۱۲۹

شکل (۲۹-۷) : کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول..... ۱۳۱

شکل (۳۰-۷) : منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۳۳

شکل (۳۱-۷) : کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در مقاطع AB و CD مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۳۵

شکل (۳۲-۷) : مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۳..... ۱۳۷

شکل (۳۳-۷) : منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۳ در مراحل مختلف حفاری..... ۱۴۰

شکل (۳۴-۷) : کنتور جابجایی قائم مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول..... ۱۴۱

شکل (۳۵-۷) : پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول..... ۱۴۱

شکل (۳۶-۷) : کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول..... ۱۴۱

شکل (۳۷-۷) : کنتور جابجایی قائم مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۴۲

شکل (۳۸-۷) : پروفیل نشست سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۴۲

شکل (۳۹-۷) : کنتور جابجایی افقی سطح زمین مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۴۳

شکل (۴۰-۷) : منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول..... ۱۴۴

شکل (۴۱-۷) : کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در سطح مقطع AB و CD مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول..... ۱۴۶

شکل (۴۲-۷) : منحنی‌های نشست سطح زمین در سطح مقطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۴۸

شکل (۴۳-۷) : کنتورهای جابجایی افقی سطح زمین در مقاطع AB و CD مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم..... ۱۵۰

شکل (۴۴-۷) : مدل اجزاء محدود و موقعیت قرارگیری ساختمان‌های مقطع ۴..... ۱۵۲

شکل (۴۵-۷) : منحنی‌های نشست سطح زمین برای مقطع ۴ در مراحل مختلف حفاری..... ۱۵۵

شکل (۴۶-۷) : کنتور جابجایی قائم پس از حفاری تونل اول..... ۱۵۶

شکل (۴۷-۷) : پروفیل نشست سطح زمین پس از حفاری تونل اول..... ۱۵۶

شکل (۴۸-۷) : کنتور جابجایی افقی سطح زمین پس از حفاری تونل اول..... ۱۵۷

شکل (۴۹-۷) : کنتور جابجایی قائم پس از حفاری تونل دوم..... ۱۵۷

شکل (۵۰-۷) : پروفیل نشست سطح زمین پس از حفاری تونل دوم..... ۱۵۸

شکل (۵۱-۷) : کنتور جابجایی افقی سطح زمین پس از حفاری تونل دوم..... ۱۵۸

شکل (۵۲-۷) : منحنی‌های نشست سطح زمین در مقاطع AB و CD برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول..... ۱۶۰

شکل (۵۳-۷) : 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) : کنترهای 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 بورلند 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 (۵-۷) : پارامترهای سیستم نگهداری ۹۸

جدول (۶-۷) : فاصله سازه‌ها از محور تونل ۱۰۰

جدول (۷-۷) : مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۱ ۱۰۵

جدول (۸-۷) : مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۱ ۱۰۶

جدول (۹-۷) : مقاطع مورد بررسی ۱۰۶

جدول (۱۰-۷) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل اول ۱۱۶

جدول (۱۱-۷) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۱ پس از حفاری تونل دوم ۱۲۰

جدول (۱۲-۷) : مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۱ ۱۲۰

جدول (۱۳-۷) : مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۲ ۱۲۳

جدول (۱۴-۷) : مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۲ ۱۲۳

جدول (۱۵-۷) : مقاطع مورد بررسی ۱۲۳

جدول (۱۶-۷) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل اول ۱۳۱

جدول (۱۷-۷) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۲ پس از حفاری تونل دوم ۱۳۶

جدول (۱۸-۷) : مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۲ ۱۳۶

جدول (۱۹-۷) : مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۳ ۱۳۷

جدول (۲۰-۷) : مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۳ ۱۳۸

جدول (۲۱-۷) : مقاطع مورد بررسی ۱۳۸

جدول (۲۲-۷) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل اول ۱۴۷

جدول (۲۳-۷) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۳ پس از حفاری تونل دوم ۱۵۱

جدول (۲۴-۷) : مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۳ ۱۵۱

جدول (۲۵-۷) : مشخصات مدل اجزاء محدود مقطع ۴ ۱۵۳

جدول (۲۶-۷) : مشخصات بار و پی ساختمان‌های مقطع ۴ ۱۵۳

جدول (۲۷-۷) : مقاطع مورد بررسی ۱۵۳

جدول (۲۸-۷) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل اول ۱۶۲

جدول (۲۹-۷) : ماکزیمم جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های مقطع ۴ پس از حفاری تونل دوم ۱۶۶

جدول (۳۰-۷) : مقادیر نشست در نقاط مختلف پی ساختمان‌های مقطع ۴ ۱۶۷

جدول (۳۱-۷) : نتایج نهایی ماکزیمم نشست ساختمان‌ها ۱۷۲

جدول (۱-۸) : نتایج نشست نهایی سطح زمین در حالت سطح آزاد و با وجود ساختمان برای مقاطع مورد بررسی ۱۷۶

جدول (۲-۸) : 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 لیتونیسیم (۱۹۵۶) ارائه شد. پس از آن می‌توان به روش‌های تجربی پک (۱۹۶۹)، اوتئو (۱۹۷۹)، هرزوغ (۱۹۹۲)، آری‌اغلو (۱۹۹۲)، روش‌های تحلیلی ساگاستا (۱۹۸۷)، ورویجیت 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.

۲-۱ 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.

۳-۱ 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 بار سنگ 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.

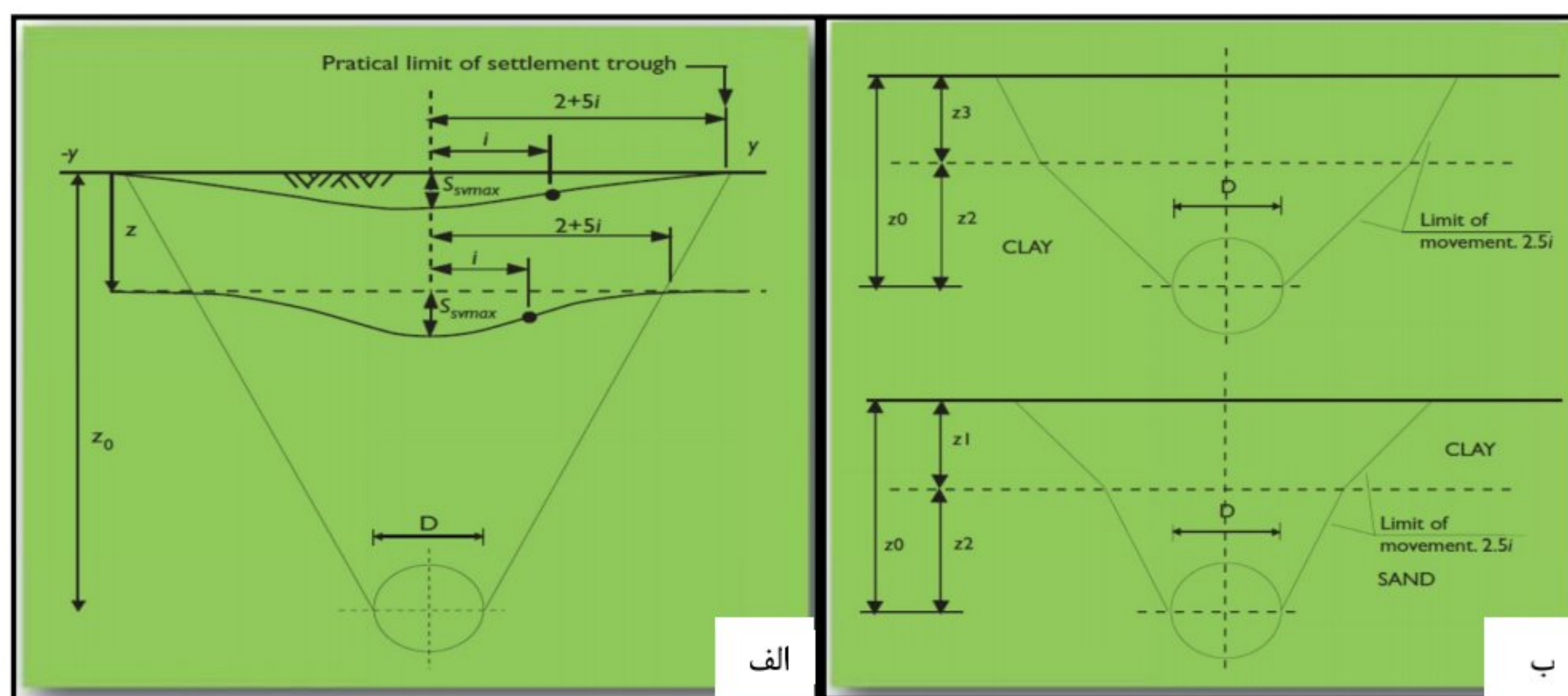
۴- توده‌سنگ‌های نزدیک سطح زمین در معرض تنش‌زدایی، هوازدگی و آسیب‌های ناشی از انفجار به عنوان نتیجه‌ای از حفاریات مجاور هستند. این مشکلات باعث تداخل در قفل‌شدگی بین ذرات سنگ شده

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. بعبارتی 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

اصلی‌ترین اختلاف در روش‌های اجرا به فاصله زمانی بین حفر تونل و نصب سیستم نگهداری مربوط می‌شود. با استفاده از روش حفاری سپری می‌توان این زمان را به مقدار خیلی کم کاهش داد. به عبارتی هر چه مدت زمان بین حفاری و نصب سیستم نگهداری کاهش یابد تغییر شکل‌های اندکی در محیط اتفاق می‌افتد. از این نظر روش حفاری سپری نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد [۲].

۳-۱-۱-۲ عمق تونل

عمقی که تونل در آن حفر می‌شود یک فاکتور بسیار موثر بر روی احتمال بروز نشست در سطح زمین بشمار می‌آید. روشن است اگر تونل در عمق زیاد حفر شود، در اینصورت حتی اثرات ریزش‌های عظیم و گسترده سقف ممکن است قبل از رسیدن به سطح خنثی شده و از بین برود. جابجایی‌هایی که در اثر حفاری تونل در اعماق مختلف ایجاد می‌شوند، تمایل دارند که به سطح زمین منتقل شوند. بر اساس نتیجه‌گیری اندازه‌گیری‌های برجا و مشاهدات، مطابق شکل (۲-۲) دو حالت برای انتقال نشست‌های ایجاد شده به سطح تعیین شده است [۲].

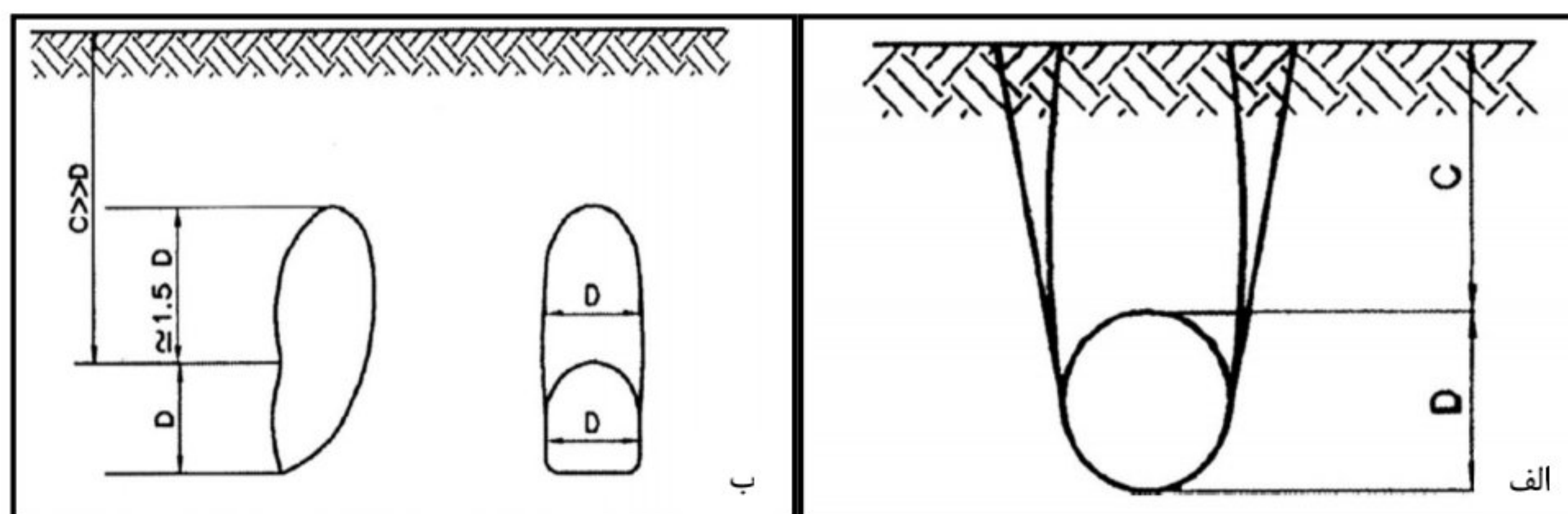
حالت اول

این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که رهاسازی تنش در سینه‌کار اتفاق بیافتد، که این با شکل‌گیری زون سست شده بالای فضای حفاری شده تعیین می‌شود. ارتفاع این زون معمولاً $1/5$ برابر قطر تونل می‌باشد [۲].

حالت دوم

این حالت ممکن است زمانی اتفاق بیافتد که تونل نزدیک سطح زمین $(\frac{C}{D} < 2/5)$ قرار گرفته باشد و تنش جانبی وارده کم باشد. این شرایط منجر به شکل‌گیری بلوک‌های 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 آنی 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 آنی 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:

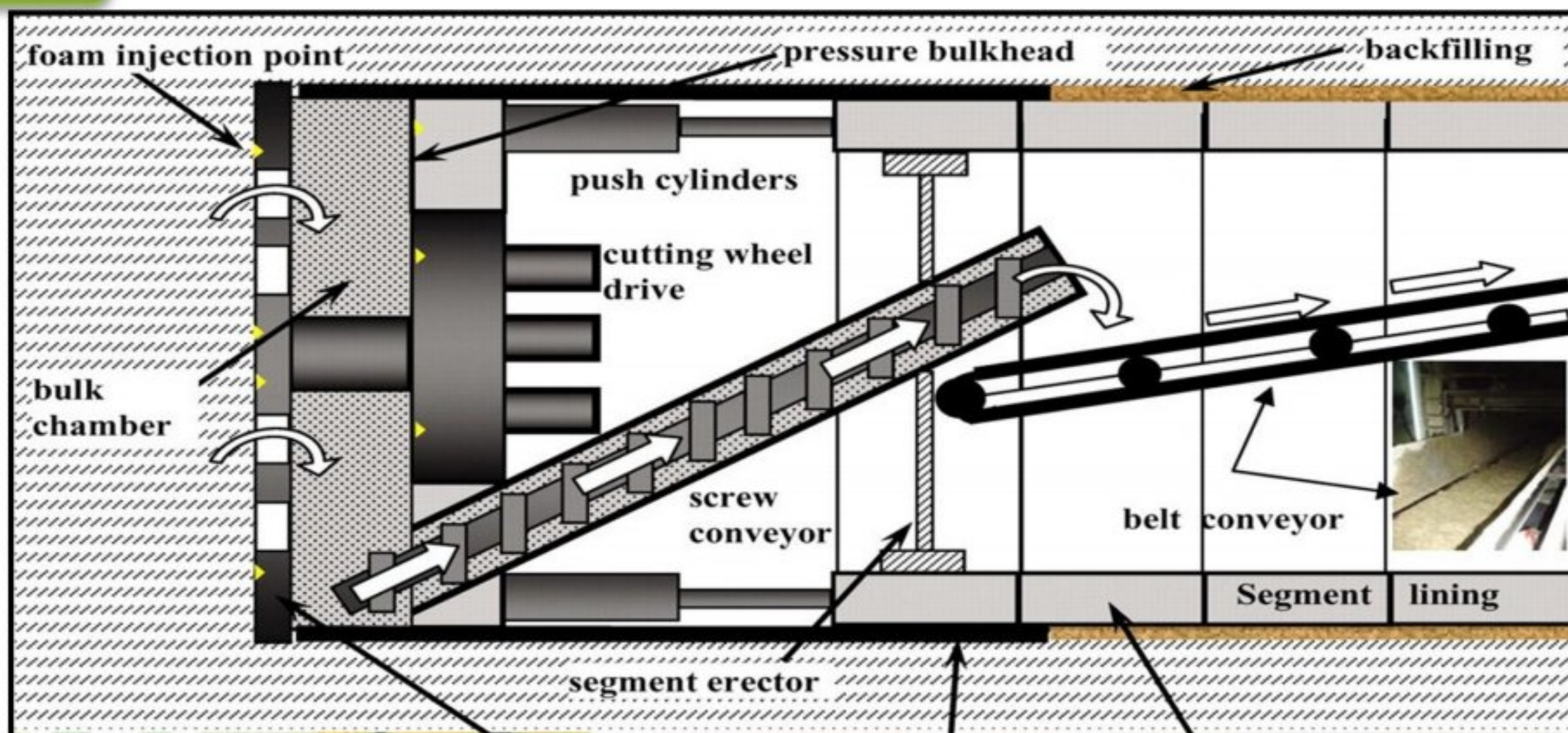
الف) تحکیم اولیه: که معمولاً در خاک‌های چسبنده و تراکم‌پذیر در طی پراکندگی فشار منفذی زیاد صورت می‌گیرد؛

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

۱-۲-۲ 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 حفار 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 جک های 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.
- ماشین های تونل زنی از هر نوعی که باشند، با حفاری و پیشروی در زمین های سست باعث ایجاد نشست می شوند. دستگاه حفاری متعادل کننده فشار زمین نیز از این قاعده مستثنی نمی باشد [۵].

۱-۱-۲-۲ 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 می‌شود، که در نتیجه افت سینه کار سبب نشست جلوی سینه کار می‌شود [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 می‌شود: اولاً قطر کله حفار نسبت به بدنه سپر کمی بزرگ‌تر ساخته می‌شوند دلیل این کار این است که از تماس سپر با خاک جلوگیری شود تا اصطکاک بین سپر و خاک کاهش یابد. دوماً اضافه حفاری در سینه کار تونل اتفاق می‌افتد [۳].

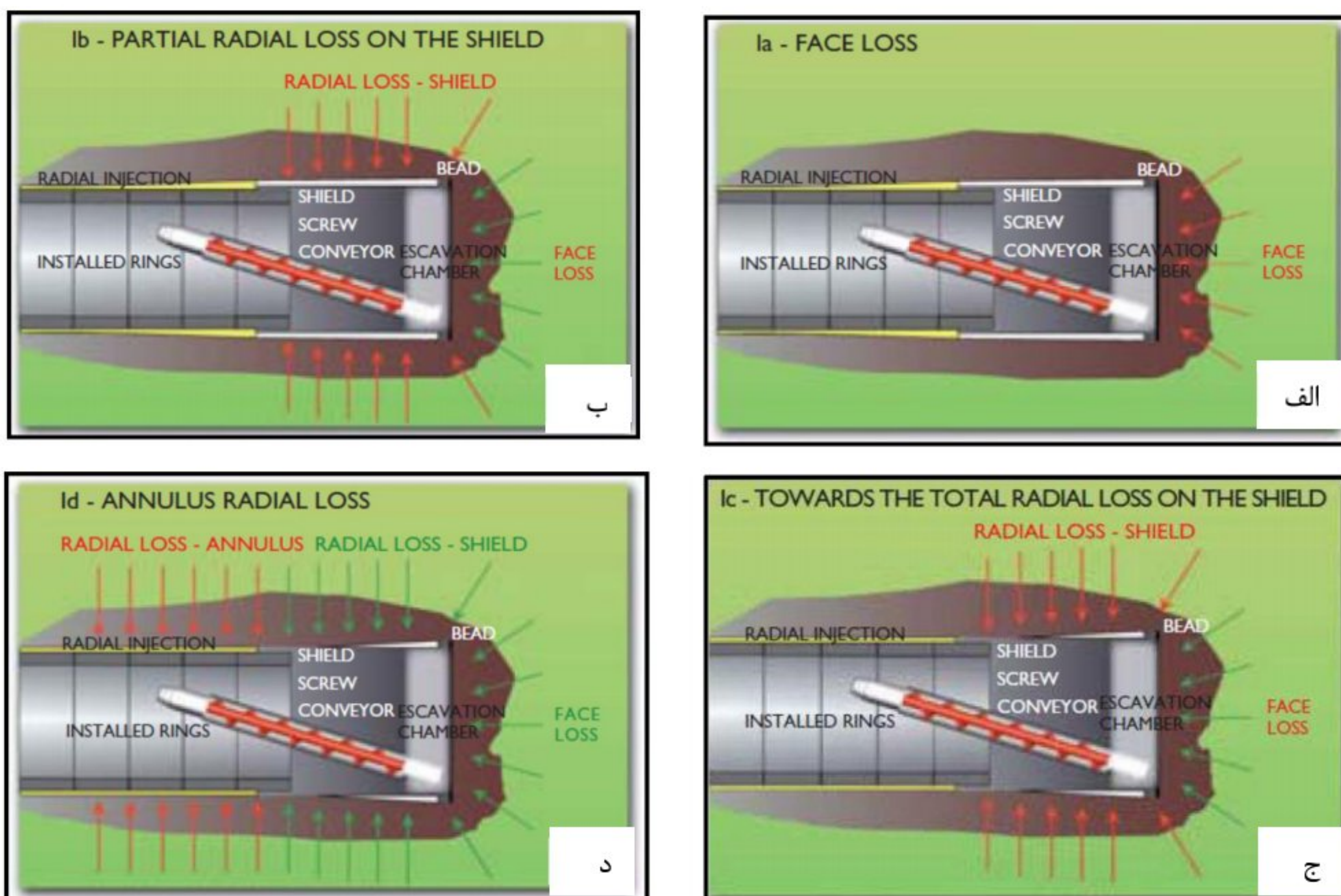
ج- فاصله بین سیستم نگهداری و مرزهای حفاری تونل

سیستم نگهداری که قطر آن نسبت به قطر سپر کمی کوچکتر می‌باشد، در داخل سپر نصب می‌شود و فضای دایروی بین سیستم نگهداری و زمین فوراً با تزریق دوغاب پر می‌شود. 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 می‌شود. مجموع افت سینه کار و افت شعاعی منجر به افت حجم کلی^۲ (V_L) می‌شود که از حفاری تونل ناشی می‌شود. همانطوریکه قبلاً اشاره شد افت حجم در عمق تونل می‌تواند 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 می‌شود را نشان می‌دهد.

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 (۱-۲) 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)	$K=0.15-0.17$ $V_L=0.14-0.19$	$C=0 \rightarrow K=0.13$ $C>0 \rightarrow K=0.15$ $V_L=0.16-0.17$	$C=0 \rightarrow K=0.13$ $C>0 \rightarrow K=0.15$ $V_L=0.15-0.19$	$C=0 \rightarrow K=0.13$ $C>0 \rightarrow K=0.15$ $V_L=0.14-0.18$
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