

## تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی (مطالعه موردی: پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز)

هوشنگ کاتبی (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمود سعدین، کارشناس ارشد، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

Email: Katebi@tabrizu.ac.ir

### چکیده

به طور کلی محیط زمین در ابتدا تحت فشار ناشی از تنشهای طبیعی بوده و هرگونه دستخوردگی همانند حفر تونل این وضعیت تنش را مختل کرده و سبب پدید آمدن تغییر مکانهایی در مقطع زمین می‌شود که اگر این تغییر مکانها در محدوده استاندارد نباشند، موجب بروز مشکلاتی در ساختارهای سطحی و زیر سطحی می‌شوند که گاهی خسارتهای زیادی را به دنبال دارند.

در این مقاله با مطالعه و بررسیهای متعدد تحلیلی به کمک نرم افزار پلکسیس دو بعدی ۸.۲ در مورد ویژگیهای نشست زمین در اثر حفر تونلهای مترو در مناطق شهری، کوشش شده است که ارتباطهایی بین تغییر شکل و جابجائی زمین با مشخصههایی نظیر وزن واحد خاک، مدول الاستیسیته، قطر تونل، عمق محور تونل و بعضی کمیت‌های دیگر به دست آید و با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته، نشان داده شده است که چه پارامترهایی و تا چه اندازه می‌توانند در موارد ذکر شده مؤثر باشند و کدام اهمیت دارند یا حتی فاقد ارتباط یا نقش تعیین کننده هستند. همچنین برای پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین برای خط ۲ متروی تبریز برای گمانه شماره (BH-10) مقادیر حاصله نشان می‌دهند که میزان نشست سطح زمین تا حد فراوانی به میزان پارامتر انقباض بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: نشست سطحی، نرم افزار PLAXIS، حفاری، تونل سازی.

## ۱. مقدمه

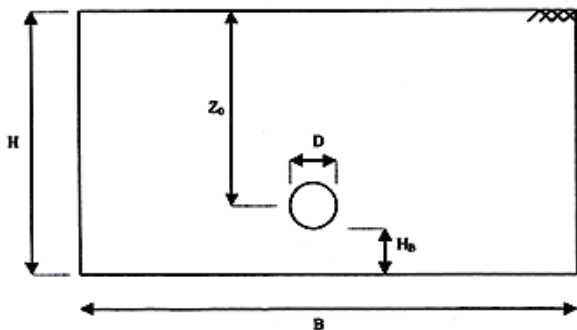
دسترسی به پارامترهای مقاومتی خاک و تنها با داشتن پارامترهای محیط الاستیک یعنی مدول الاستیسیته و ضریب پواسون نشست خاک ناشی از حفر تونل را تخمین زد [میرمیرانی، ۱۳۸۰، Lee, et.al., 1999 and Loganathan, 1998].

در این مقاله نمودارهای نشست سطح زمین و تاج تونل و همچنین نسبت نشست بر حسب پارامترهای ذکر شده در دو بخش تونلهای فاقد پوشش داخلی و تونلهای پوشش دار مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## ۲. بررسی پارامترهای هندسی و مدل مبنا

همان طور که بیان شد، مدل در نظر گرفته شده در این مرحله، دو بعدی و دارای رفتار الاستیک خطی است. برای نشان دادن مشخصات فیزیکی خاک در محیطهای الاستیک، مدول الاستیسیته (E)، دانسیته ( $\gamma$ ) و ضریب پواسون ( $\nu$ ) قابل تعریف است. حل به صورت کرنش صفحه ای و تونل دایره ای شکل است. محدوده مدل هندسی، مستطیلی شکل است و در دو ضلع کناری اجازه تغییر مکان قائم دارد. در حالی که ضلع پائینی در جهت قائم و افقی بسته است. بسته بودن ضلع پائین مدل، در حقیقت نشانگر بستر سنگی است [Sagaseta, 1987 and Brinkgreve, 2002].

ابعادی که برای مدلسازی به آنها نیاز است عبارتند از: عرض و ارتفاع مدل هندسی (B,H)، قطر تونل (D)، عمق محور تونل ( $Z_0$ )، و ضخامت کف تونل تا بستر سنگی ( $H_B$ ). شکل ۱ مشخصات وضعیت هندسی محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد [میرمیرانی، ۱۳۸۰].



شکل ۱. ابعاد هندسی و وضعیت نسبی تونل در محدوده مدل

حفر تونل در زمینهای خاکی می تواند منجر به ایجاد جابجایی های افقی و عمودی در اطراف تونل شود. این جابجاییها می توانند به سطح زمین رسیده و موجب آسیب رساندن به سازه های موجود در سطح زمین شوند. بنابراین تخمین میزان نشست زمین در اثر حفاری، بخصوص در محیطهای شهری از اهمیت بسیاری برخوردار است. هدف از این مطالعه در واقع یک نوع پیش بینی از وضعیت نشستهای سطحی حاصل از حفر تونلهای مترو واقع در مناطق شهری است. با توجه به اهمیت ابنیه تاریخی و بافت قدیمی شهر تبریز، توجه به تأثیر حفر این فضای زیرزمینی بر محیط اطراف، منجمله نشست سطح زمین، ضروری است.

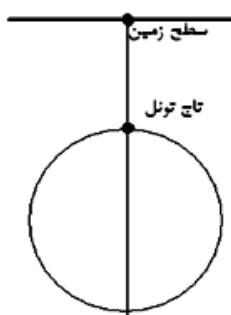
معمولاً محیطهای خاکی دارای خواص بسیار متفاوت و تنوع رفتار هستند. مدلهای رفتاری بسیاری برای رفتار خاکها تعریف شده است که از جمله می توان مدلهای الاستیک، الاستو پلاستیک و الاستو ویسکوپلاستیک را نام برد. مدلهای الاستیک می توانند خطی یا غیر خطی باشند. خاکها در مدلهای الاستو پلاستیک در تنشهای پایین به صورت الاستیک عمل می کنند و در تنشهای بالاتر شروع به گسیخته شدن می کنند و اصطلاحاً پلاستیک می شوند [میرمیرانی، ۱۳۸۰، شریعتمداری و فرزانه، ۱۳۸۰ و وفائیان، ۱۳۸۰]. برای بررسی موضوع مورد بحث در حوزه الاستیک و با توجه به این که پارامترها و کمیتهای مختلفی بر مقادیر نشست در سطح زمین و تاج تونل تأثیر گذار است، [Mair, Tailor and Bracegirdle, 1995]. در این مقاله میزان تأثیر هر یک از پارامترها مورد محاسبه و بررسی قرار می گیرد. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از:

الف: پارامترهای فیزیکی - مکانیکی مانند: مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، دانسیته

ب: پارامترهای هندسی مانند: قطر تونل، عمق تونل، مرزهای افقی و قائم مدل مورد نظر

در این بررسی رفتار خاک به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است، به طور کلی رفتار زمین در اثر حفر تونل تقریباً الاستیکی است و دگرشکلیهای اطراف تونل عمدتاً کرنشهای الاستیک هستند، این موضوع سبب می شود که بتوان بدون

## تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی ...



شکل ۳. نقاط در نظر گرفته شده در بررسی توزیع تغییر شکل‌های محاسبه شده

نتایج محاسبات برای مدل اصلی با مشخصات ذکر شده در جدول ۱، در جدول ۲ آورده شده است.

$$S_c = (\text{mm}) \text{ بیشینه نشست تاج تونل}$$

$$S_{\max} = (\text{mm}) \text{ بیشینه نشست سطح زمین در محور تونل}$$

جدول ۲ نشانگر نشستهای سطح زمین و همچنین تاج تونل است.

$\lambda$  نسبت نشست بیشینه در سطح زمین وابسته به نشست در تاج

تونل است ( $\lambda = S_{\max}/S_c$ ) و از این پس اختصاراً نسبت

در این قسمت مشخصات خاک، ابعاد مدل مورد نظر و مشخصات هندسی تونل، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۲ نمونه‌ای از مدل اصلی با ابعاد  $30\text{m} \times 120\text{m}$  را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که در این مدلسازی از شبکه بندی متوسط استفاده شده است و شبکه بندی در نواحی نزدیک تونل ریزتر شده است. (توضیح نحوه آنالیز حساسیت درباره ابعاد مدل اصلی انتخابی در بخش ۴-۳ شرح داده خواهد شد.) خاک مورد بررسی در اینجا خاک رسی با رفتار الاستیک بوده و دارای مشخصات زیر است [Row, 1983, Peck, 1969] و بهپور گوهری، ۱۳۸۵].

در تمامی محاسبات مشخصات خاک و تونل اساساً همانهایی است که در جدول ۱ مشخص شده، مگر در مواردی که پارامتر مورد بررسی تغییر یافته و ذکر گردیده است.

جابجایی‌های خاک در تاج تونل و در سطح زمین مطابق شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفته است [میرمیرانی، ۱۳۸۰]. مشخصات هندسی تونل مورد نظر به شرح زیر است:

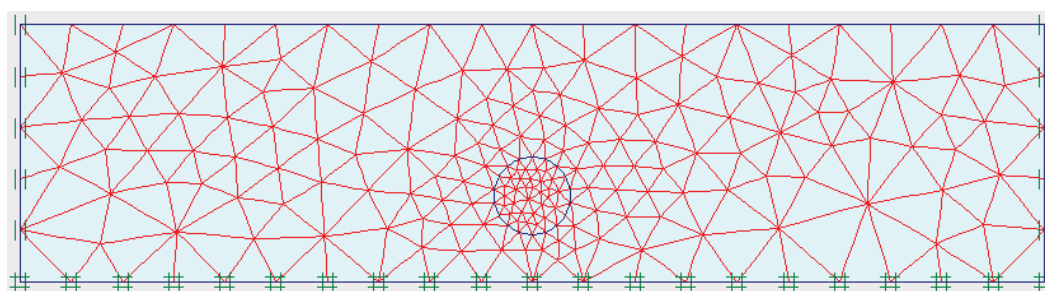
$$D = 9\text{m} \text{ قطر تونل} \quad Z_0 = 20\text{m} \text{ عمق تونل}$$

جدول ۱. مشخصات مدل اصلی خاک در بررسی نشست خاک

| ضریب پواسون $\nu$ | مدول الاستیسیته $E_u (KN/m^3)$ | نفوذپذیری در جهت Y $ky (m/day)$ | نفوذپذیری در جهت X $kx (m/day)$ | دانسیته تر خاک $\gamma_{wet} (KN/m^3)$ | دانسیته خشک خاک $\gamma_{dry} (KN/m^3)$ |
|-------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---|
| ۰/۳               | $5 \times 10^4$                | $1 \times 10^{-4}$              | $1 \times 10^{-4}$              | ۱۹                                     | ۱۶                                      |

جدول ۱. مشخصات مدل اصلی خاک در بررسی نشست خاک

| نسبت نشست $\lambda$ | بیشینه نشست سطح زمین در محور تونل $S_{\max} (\text{mm})$ | بیشینه نشست تاج تونل $S_c (\text{mm})$ |
|---------------------|--|--|
| ۰/۴۷۰               | ۱۸/۹۴  | ۴۰/۲۲                                  |



شکل ۲. شبکه اجزاء محدود مدل اصلی و محیط اطراف آن

نتایج به برداشتهای عملی را می توان از روابط الاستیک به دست آورد. مطابق محاسبات و شکل ۶، میزان نشست در خاک با  $E$  نسبت کاملاً عکس دارد به طوری که به علت رفتار الاستیک خاک با ۱۰ برابر شدن مقدار  $E$ ، مقدار نشست خاک ۰/۱ برابر می شود. برای بررسی اثر مدول الاستیسیته بر نشست، مدل اصلی با مدول الاستیسیته  $5 \times 10^4 \text{ KN/m}^2$  با سه مدل دیگر مقایسه شده است، نتایج مقایسه ها در جدول ۴ آورده شده است. به علت اینکه محیط الاستیک عمل می کند، با تغییر مدول الاستیسیته نسبت نشست ( $\lambda$ ) تغییر نمی یابد (شکل ۷)

### ۳-۳ بررسی اثر دانسیته خاک ( $\gamma$ )

برای نشان دادن اثر دانسیته، مدل اصلی با مقدار دانسیته  $16 \text{ KN/m}^2$  با ۶ مدل دیگر با دانسیته  $۱۴/۵$ ،  $۱۵/۵$ ،  $۱۷$ ،  $۱۸$ ،  $۱۹$  و  $۲۰$  مقایسه شده است (جدول ۵). نتایج این مقایسه ها نشانگر این واقعیت است که با افزایش مقدار  $\gamma$  مقدار نشست در سطح زمین و تاج تونل افزایش می یابد (شکل ۸). همان طور که ملاحظه می شود تغییرات دانسیته بر روی نسبت نشست  $\lambda$  تأثیری ندارد (شکل ۹)

نشست نامیده می شود [میرمیرانی، ۱۳۸۰ و وفاپیان، ۱۳۸۰] برای بررسی نشست خاک در اثر حفر تونل ابتدا وابستگی نشست به پارامترهای خاک و سپس وابستگی نشست نسبت به مشخصات هندسی مدل مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳ بررسی اثر فراسنجهای فیزیکی - مکانیکی

#### ۱-۳ بررسی تأثیر ضریب پواسون ( $\nu$ )

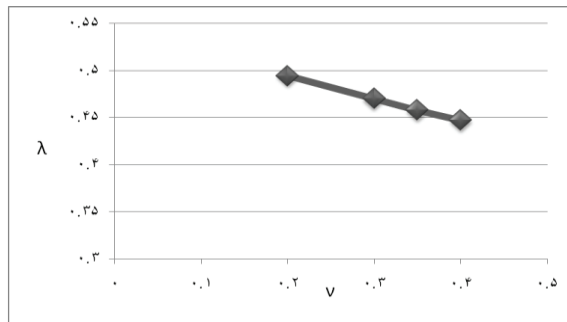
برای بررسی اثر ضریب پواسون در نشست خاک مدل اصلی دارای ضریب پواسون  $\nu=۰/۳$  با مقادیر  $\nu=۰/۲$  و  $\nu=۰/۳۵$  و  $\nu=۰/۴$  مقایسه شده است (شکل های ۵ و ۶). چنان که در جدول ۳ مشاهده می شود با افزایش ضریب پواسون نشست بیشینه در سطح زمین و تاج تونل افزایش می یابد، همچنین نتیجه می شود که با افزایش ضریب پواسون مقدار  $\lambda$  کاهش می یابد (جدول ۳).

#### ۲-۳ بررسی تأثیر مدول الاستیسیته خاک ( $E$ )

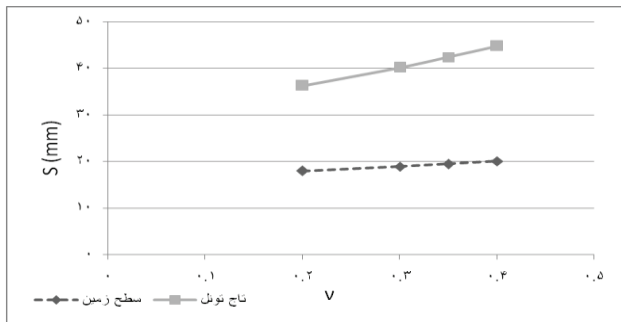
در خصوص روابط ارائه شده برای تخمین نشست، نزدیک ترین

جدول ۳. حداکثر نشست سطح زمین و تاج تونل برای مقادیر مختلف ضرایب پواسون

| ضریب پواسون<br>$\nu$                   | ۰/۲   | ۰/۳   | ۰/۳۵  | ۰/۴   |
|--|-------|-------|-------|-------|
| نشست سطح زمین<br>$S_{\max}(\text{mm})$ | ۱۷/۹۵ | ۱۸/۹۴ | ۱۹/۴۶ | ۲۰/۰۵ |
| نشست تاج تونل<br>$S_c(\text{mm})$      | ۳۶/۳۰ | ۴۰/۲۲ | ۴۲/۴۴ | ۴۴/۸۱ |
| نسبت نشست<br>$\lambda$                 | ۰/۴۹۴ | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۵۸ | ۰/۴۴۷ |



شکل ۵. تأثیر ضرایب پواسون خاک بر نسبت نشست



شکل ۴. تأثیر ضرایب پواسون خاک بر نشست سطح زمین و تاج تونل

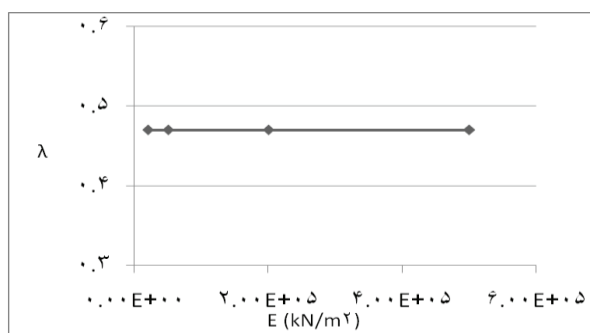
تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی ...

جدول ۴. حداکثر نشست سطح زمین و تاج تونل برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته

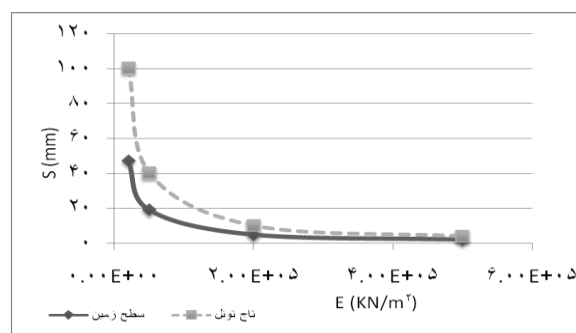
| مدول الاستیسیته<br>$E(\text{KN/m}^2)$  | $5 \times 10^4$ | $10 \times 10^4$ | $20 \times 10^4$ | $40 \times 10^4$ |
|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| نشست سطح زمین<br>$S_{\max}(\text{mm})$ | ۱۸/۹۴           | ۱/۸۹             | ۴۷/۳۴            | ۴/۷۳             |
| نشست تاج تونل<br>$S_c(\text{mm})$      | ۴۰/۲۲           | ۴/۰۲             | ۱۰۰/۵۶           | ۱۰/۰۵            |
| نسبت نشست<br>$\lambda$                 | ۰/۴۷۰           | ۰/۴۷۰            | ۰/۴۷۰            | ۰/۴۷۰            |

جدول ۵. حداکثر نشست سطح زمین و تاج تونل برای مقادیر مختلف دانسیته خاک

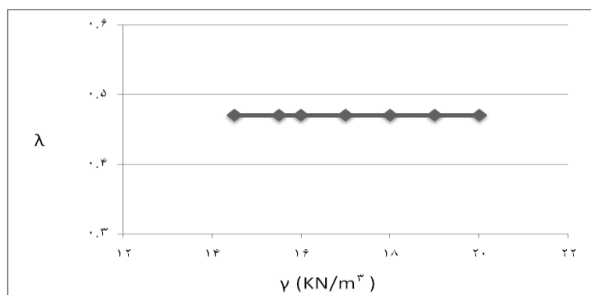
| دانسیته خاک<br>$\gamma(\text{KN/m}^3)$ | ۱۴/۵  | ۱۵/۵  | ۱۶    | ۱۷    | ۱۸    | ۱۹    | ۲۰    |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| نشست سطح زمین<br>$S_{\max}(\text{mm})$ | ۱۷/۱۶ | ۱۸/۳۴ | ۱۸/۹۴ | ۲۰/۱۲ | ۲۱/۳۰ | ۲۲/۴۸ | ۲۳/۶۷ |
| نشست تاج تونل<br>$S_c(\text{mm})$      | ۳۶/۴۵ | ۳۸/۹۷ | ۴۰/۲۲ | ۴۲/۷۴ | ۴۵/۲۵ | ۴۷/۷۶ | ۵۰/۲۸ |
| نسبت نشست<br>$\lambda$                 | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۷۰ |



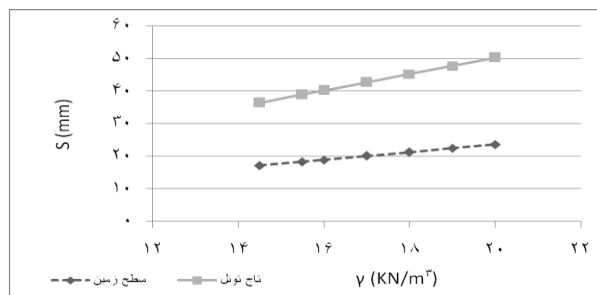
شکل ۷. تأثیر مدول الاستیسیته خاک بر نسبت نشست



شکل ۸. تأثیر مدول الاستیسیته خاک بر نشست سطح زمین و تاج تونل



شکل ۹. تأثیر دانسیته خاک بر نسبت نشست



شکل ۱۰. تأثیر دانسیته خاک بر نشست سطح زمین و تاج تونل

#### ۴. بررسی اثر فراسنجهای هندسی

##### ۴-۱ بررسی اثر قطر تونل (D)

برای نشان دادن تأثیر قطر تونل بر نشست، مدل اصل با قطر ۹ متر با ۸ مدل دیگر دارای قطرهای ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۱۰ متر مقایسه شد که جدول ۶ مقدار نشست سطح زمین و تاج تونل را در قطرهای مختلف نشان می‌دهد، با توجه به شکل ۱۰ و همچنین با مقایسه اعداد جدول ۶ مشاهده می‌شود که تغییر قطر تونل تأثیر زیادی بر نشست خاک دارد به طوری که با افزایش قطر تونل این نشست‌ها به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش قطر تونل، نسبت نشست افزایش یافته است (شکل ۱۱)

##### ۴-۲ بررسی اثر ضخامت لایه زیر تونل ( $H_p$ )

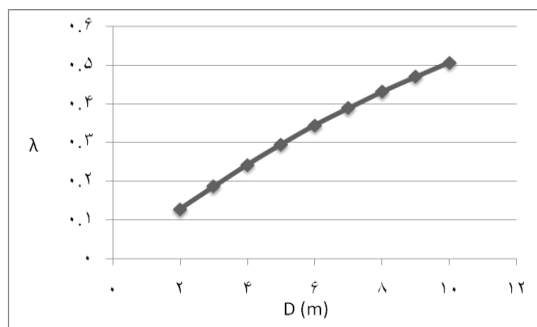
ضخامت لایه زیر تونل بر نحوه توزیع تنش در اطراف تونل اثر گذار است، این اثر بیشتر در نیمه پایینی تونل دیده می‌شود. هر چه این ضخامت کمتر باشد، تغییر مکانها در آن منطقه

محدودتر خواهند بود و بالعکس اگر ضخامت این لایه زیاد باشد، به هم خوردن تعادل تنشها در اثر حفر تونل، سبب تغییر مکانهای نسبتاً زیاد در اعماق پایین‌تر از کف تونل خواهد شد. این اثرات در بالا آمدگی (heave) درکف تونل مشهود است و البته در اعماق زیاد انتظار نمی‌رود که ضخامت لایه زیر تونل اثر زیادی بر نشست تاج تونل و نهایتاً نسبت نشست ( $\lambda$ ) داشته باشد.

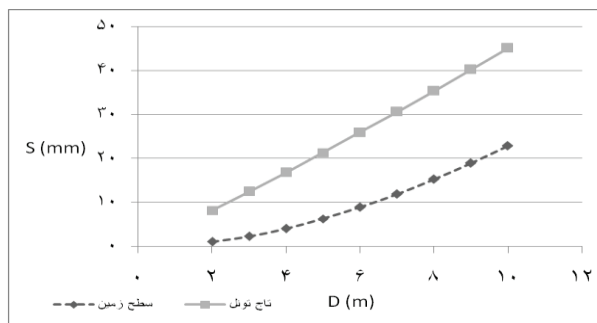
برای بررسی این اثر مدل اصلی با ضخامت لایه زیرین برابر با ۵/۵ متر با ۷ مدل دیگر به ضخامتهای ۰/۵، ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵، ۸/۵، ۱۱/۵ و ۱۵/۵ مقایسه شده است، همان طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لایه زیر تونل نشستهای سطح زمین و تاج تونل تغییر کمی در حدود ۵ میلی متر داشته است، ولی بالآمدگی کف تونل با افزایش ضخامت لایه زیر تونل افزایش پیدا کرده است (شکل ۱۲). همچنین با افزایش ضخامت لایه زیر تونل مقدار نسبت نشست ( $\lambda$ ) به مقدار کمی کاهش یافته است (شکل ۱۳)

جدول ۶. حداکثر نشست سطح زمین و تاج تونل برای مقادیر مختلف قطر تونل

| قطر تونل<br>D (m)              | ۲     | ۳     | ۴     | ۵     | ۶     | ۷     | ۸     | ۹     | ۱۰    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| نشست سطح زمین<br>$S_{max}(mm)$ | ۱/۰۴  | ۲/۳۲  | ۴/۰۸  | ۶/۳۰  | ۸/۹۲  | ۱۱/۹۲ | ۱۵/۲۷ | ۱۸/۹۴ | ۲۲/۸۸ |
| نشست تاج تونل<br>$S_c(mm)$     | ۸/۱۸  | ۱۲/۴۲ | ۱۶/۸۰ | ۲۱/۳۳ | ۲۵/۹۱ | ۳۰/۶۰ | ۳۵/۳۸ | ۴۰/۲۲ | ۴۵/۱۴ |
| نسبت نشست<br>$\lambda$         | ۰/۱۲۷ | ۰/۱۸۶ | ۰/۲۴۲ | ۰/۲۹۵ | ۰/۳۴۴ | ۰/۳۸۹ | ۰/۴۳۱ | ۰/۴۷۰ | ۰/۵۰۶ |



شکل ۱۱. تأثیر قطر تونل بر نسبت نشست

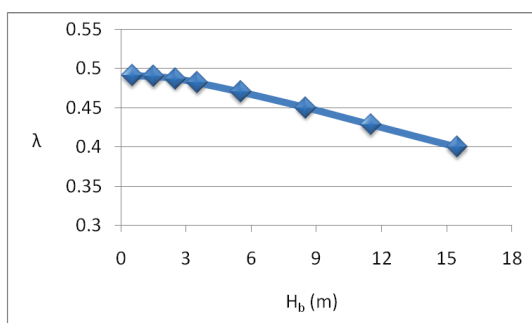


شکل ۱۰. تأثیر قطر تونل بر نشست سطح زمین و تاج تونل

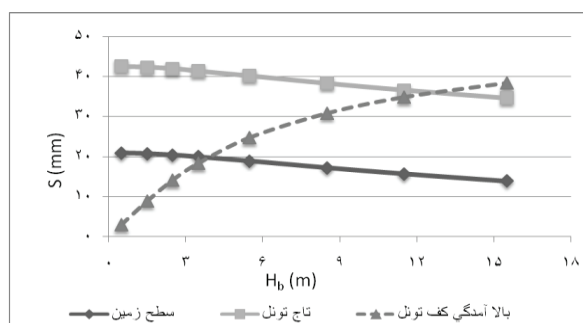
## تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی ...

جدول ۷. حداکثر نشست سطح زمین و تاج تونل و بالا آمدگی کف تونل و نسبت نشست.

| ۱۵/۵  | ۱۱/۵  | ۸/۵   | ۵/۵   | ۳/۵   | ۲/۵   | ۱/۵   | ۰/۵   | ضخامت لایه زیر تونل<br>$H_b$   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|
| ۱۳/۸۹ | ۱۵/۷۰ | ۱۷/۲۵ | ۱۸/۹۴ | ۲۰/۰۱ | ۲۰/۴۶ | ۲۰/۷۹ | ۲۰/۹۱ | نشست سطح زمین<br>$S_{max}(mm)$ |
| ۳۴/۶۶ | ۳۶/۶۳ | ۳۸/۳۴ | ۴۰/۲۲ | ۴۱/۴۵ | ۴۱/۹۸ | ۴۲/۳۷ | ۴۲/۵۶ | نشست تاج تونل<br>$S_c(mm)$     |
| ۰/۴۰۰ | ۰/۴۲۸ | ۰/۴۵۰ | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۸۲ | ۰/۴۸۷ | ۰/۴۹۰ | ۰/۴۹۱ | نسبت نشست<br>$\lambda$         |
| ۳۸/۴۵ | ۳۴/۸۸ | ۳۰/۸۹ | ۲۴/۷۱ | ۱۸/۳۰ | ۱۴/۰۸ | ۸/۹۸  | ۳/۰۱  | بالا آمدگی کف تونل             |



شکل ۱۳. تأثیر ضخامت لایه زیر تونل بر نسبت نشست



شکل ۱۴. تأثیر ضخامت لایه زیر تونل بر نشست سطح زمین و تاج تونل و بالا آمدگی کف تونل

با اجزای مختلف، مقادیری برای ابعاد مدل وجود دارند که به ازای ابعاد بزرگ تر از آنها، تغییری در پاسخ سیستم ایجاد نخواهد شد، به این مقادیر ابعاد بهینه مدل می‌گویند. آنجایی که محدوده تأثیرات ناشی از حفر تونل پس از مسافتی محور می‌شود، افزایش مرز افقی مدل سبب کاهش ناچیز در مقدار نشست خاک می‌شود.

نتایج به دست آمده، همان گونه که در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ مشخص است، نشان می‌دهد که فاصله مرزهای طرفین به میزان ۳۵ متر از خط مرکزی تونل می‌تواند دقت لازم را در پیش‌بینی بیشینه نشست سطح زمین داشته باشد و اگر پروفیل نشست سطحی مد نظر باشد و میزان نشست در یک فاصله معین از محور تونل به دست آید عرض مدلسازی باید ۶۰ متر از خط مرکزی تونل گرفته شود. (شکل ۱۶)

## ۳-۴ تأثیر گستردگی مرز افقی بر روی نشست و انتخاب

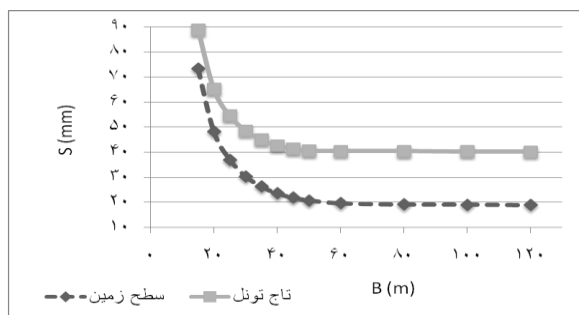
### عرض مناسب برای مدل

اغلب مسائل ژئوتکنیکی در یک محیط تقریباً نیمه بی‌نهایت اتفاق می‌افتند، لذا مدلی که به منظور بررسی سیستم واقعی استفاده می‌شود باید به گونه‌ای ساخته شود که بتواند تا حد امکان هندسه نیمه بی‌نهایت سیستم را شبیه سازی کند، در این راستا دو مبحث شرایط مرزی و ابعاد مدل، تعیین‌کننده هستند.

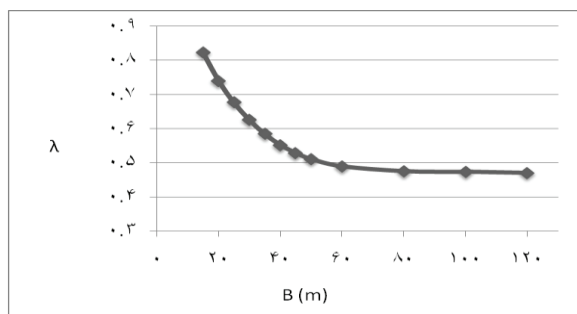
چنان که ابعاد مدل جهت شبیه‌سازی محیط نیمه بی‌نهایت خیلی بزرگ انتخاب شود، آنگاه تعداد گره‌های موجود در مدل بسیار زیاد و متعاقباً زمان انجام محاسبات نیز بسیار طولانی می‌شود، ابعاد کوچک برای مدل نیز، مغایر با شبیه سازی محیط نیمه بی‌نهایت است. بنابراین در هر مسأله مشخص

جدول ۸. حداکثر نشست سطح زمین و تاج تونل برای مقادیر مختلف ابعاد مدل

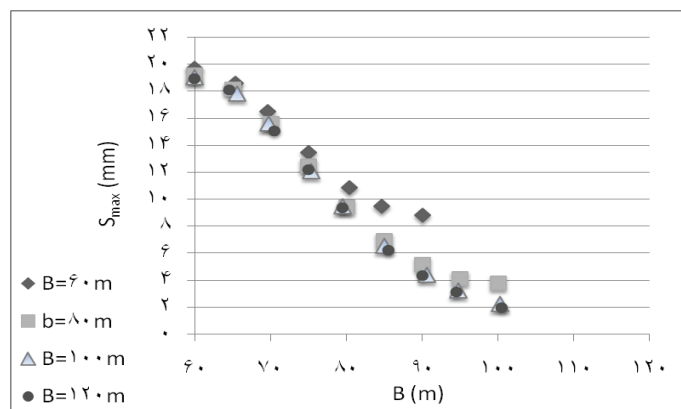
| عرض مدل‌سازی<br>B(m)           | ۱۵    | ۲۰    | ۲۵    | ۳۰    | ۳۵    | ۴۰    | ۴۵    | ۵۰    | ۶۰    | ۸۰    | ۱۰۰   | ۱۲۰   |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| نشست سطح زمین<br>$S_{max}(mm)$ | ۷۳/۲۱ | ۴۸/۲۱ | ۳۶/۹۴ | ۳۰/۳۵ | ۲۶/۲۵ | ۲۳/۵۳ | ۲۱/۸۲ | ۲۰/۷۳ | ۱۹/۶۹ | ۱۹/۱۸ | ۱۹/۰۴ | ۱۸/۹۴ |
| نشست تاج تونل<br>$S_c(mm)$     | ۸۸/۸۷ | ۶۵/۱۸ | ۵۴/۶۲ | ۴۸/۵۶ | ۴۴/۹۳ | ۴۲/۶۵ | ۴۱/۳۲ | ۴۰/۵۴ | ۴۰/۴۵ | ۴۰/۳۷ | ۴۰/۲۵ | ۴۰/۲۲ |
| نسبت نشست<br>$\lambda$         | ۰/۸۲۳ | ۰/۷۳۹ | ۰/۶۷۶ | ۰/۶۲۵ | ۰/۵۸۴ | ۰/۵۵۱ | ۰/۵۲۸ | ۰/۵۱۱ | ۰/۴۸۶ | ۰/۴۷۵ | ۰/۴۷۳ | ۰/۴۷۰ |



شکل ۱۴. تأثیر گستردگی مرز افقی بر نشست سطح زمین و تاج تونل



شکل ۱۵. تأثیر گستردگی مرز افقی بر نسبت نشست



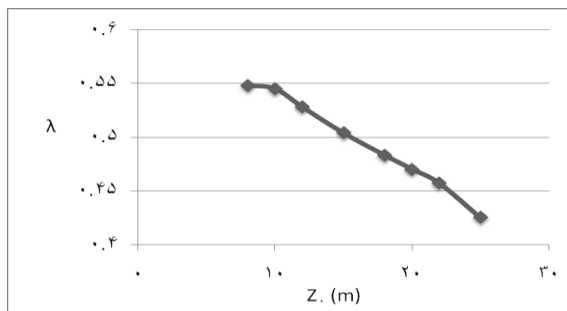
شکل ۱۶. تأثیر گستردگی مرز افقی بر نشست سطحی



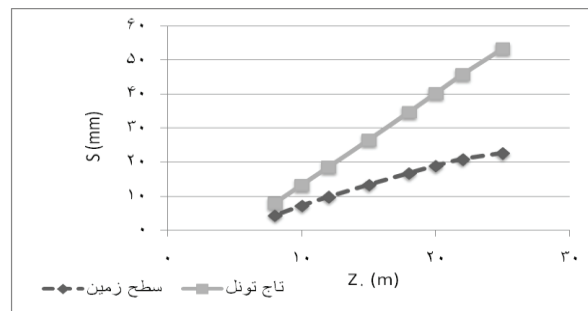
## تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی ...

جدول ۸. حداکثر نشست سطح زمین و تاج تونل برای مقادیر مختلف ابعاد مدل

| عمق تونل<br>$Z_0$              | ۸     | ۱۰    | ۱۲    | ۱۵    | ۱۸    | ۲۰    | ۲۲    | ۲۵    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| نشست سطح زمین<br>$S_{max}(mm)$ | ۴/۳۷  | ۷/۲۵  | ۹/۸۱  | ۱۳/۳۷ | ۱۶/۷۷ | ۱۹/۹۴ | ۲۰/۹۰ | ۲۲/۶۶ |
| نشست تاج تونل<br>$S_t(mm)$     | ۷/۹۷  | ۱۳/۲۸ | ۱۸/۵۵ | ۲۶/۵۳ | ۳۴/۶۹ | ۴۰/۲۲ | ۴۵/۷۵ | ۵۳/۳۳ |
| نسبت نشست<br>$\lambda$         | ۰/۵۴۸ | ۰/۵۴۵ | ۰/۵۲۸ | ۰/۵۰۴ | ۰/۴۸۳ | ۰/۴۷۰ | ۰/۴۵۷ | ۰/۴۲۵ |



شکل ۱۸. تأثیر عمق تونل بر نسبت نشست



شکل ۱۷. تأثیر عمق تونل بر نشست سطح زمین و تاج تونل

بر مشخصات خاک به ۳ عامل زیر بستگی دارد [جعفر پیشه، ۱۳۸۱ و شفیعی، ۱۳۸۵].

۱- صلیبیت پوشش: صلیبیت پوشش شامل ضخامت و مدول الاستیسیته پوشش است، با افزایش ضخامت پوشش تونل نیز، صلیبیت پوشش و مقادیر نیروهای موجود در آن افزایش یافته و نشستها به مقدار اندکی کاهش می‌یابند.

۲- تغییر شکل مجاز (gap): تغییر مکان یا گپ به صورت درصد تغییر مساحت تونل نسبت به مساحت اولیه آن تعریف می‌شود.

با تغییر پارامتر گپ نشستها در تونل به مقدار قابل توجهی تغییر می‌کند. در حالتی که تونل اجازه هیچ گونه تغییر مکانی را ندارد (gap=0٪)، نشست سطح زمین و تاج تونل ناچیز است.

۳- نفوذ پذیری پوشش: بدیهی است نفوذپذیری پوشش بر نشست تحکیمی اثرگذار است و نه نشست کوتاه مدت.

## ۴-۴ بررسی اثر عمق تونل

با افزایش عمق تونل نشست در تاج تونل و سطح زمین افزایش می‌یابد (جدول ۹). علت افزایش این نشستها در اثر بیشتر شدن عمق تونل به علت افزایش وزن سربار در بالای تاج تونل است (شکل ۱۷ و ۱۸)

## ۵. تأثیر پوشش داخلی

همان طور که می‌دانیم در اثر حفر تونل در خاک نشستهایی در سطح زمین و تاج تونل رخ می‌دهد، در حالتی که تونل هیچ گونه پوششی ندارد، این تغییر شکلها بسیار زیاد بوده و حتی ممکن است تونل ناپایدار باشد. با استفاده از پوشش می‌توان تغییر شکلهای تونل را به مقادیر مجاز کاهش داد و تونل را به حد پایداری رساند. در پوشش نیروی محوری و ممان خمشی به وجود می‌آید که مقادیر این نیروها با توجه به تغییر شکلهای مجاز تونل متفاوت است. به طور کلی نیروها و تغییر شکلهای به وجود آمده در پوشش تونل علاوه

شهر تبریز با بررسی‌های صحرایی و انجام دادن مطالعات و آزمایش‌های آزمایشگاهی مشتمل بر آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی به منظور شناخت شرایط و ویژگی‌های لایه‌های زیرزمینی و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله صورت گرفته است [شرکت مهندسی مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۵ و درویش زاده، ۱۳۷۰].

### ۶-۳ روش مدل‌سازی عددی

در تحلیل عددی برای هر مساله ژئو تکنیکی مراحل مشخصی وجود دارد که رعایت آنها در تحلیل ضروری است. این مراحل در تمامی نرم افزارهایی که با روش‌های عددی در حل مسائل ژئوتکنیکی بکار گرفته می‌شوند، دارای اصول مشابهی هستند و عبارتند از:

- تعریف هندسه مساله

- اعمال شرایط مرزی

- مش بندی

- حل مساله برای رسیدن به تعادل و بدست آوردن شرایط اولیه قبل از ایجاد سازه مورد نظر

- ایجاد سازه مورد نظر در محدوده تعریف شده

- حل مساله

نرم افزار PLAXIS نیز از این قاعده مستثنی نبوده و در ادامه با استفاده از این نرم افزار مراحل فوق برای مدل سازی تونل خط ۲ متروی تبریز توضیح داده خواهد شد. برای عملیات پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز، حفاری توسط سپرهای فشار تعادلی زمین انجام خواهد گرفت. در زمان انجام این تحقیق (سال ۸۸-۸۷) فعالیت‌های ساخت توسط سپرها هنوز شروع نشده است [راست بود، ۱۳۸۴، مهندسی مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۵ و شفیع خیرآبادی، ۱۳۸۵].

### ۶-۴ اطلاعات مربوط به مدل‌سازی خط ۲ متروی تبریز

اطلاعات لازم برای مدل‌سازی را می‌توان به دو بخش اطلاعات مربوط به سپرها و اطلاعات مربوط به زمین شناسی مسیر تقسیم کرد. در ادامه به برخی از اطلاعات مربوطه که برای مدل‌سازی در نرم افزار PLAXIS لازم است، اشاره می‌شود.

### ۶-۱ پیش‌بینی نشست در خط ۲ متروی تبریز

از چهار دهه قبل به این سو، بررسی‌های متعدد تحلیلی و اندازه گیری‌های تجربی فراوانی در مطالعه ویژگی‌های نشست زمین (و به طور کلی جابجائی خاک) در اثر حفر تونل‌های مترو در مناطق شهری انجام گرفته است. ساخت هر تونل در زمین‌های خاکی همراه با تغییر در حالت تنش زمین و متقابلاً کرنشها است، اگر این کمیت‌ها بیش از حد زیاد شوند، ممکن است شرایط نامساعدی برای زمین‌های اطراف حفاری ایجاد شود. در واقع، بسیاری از تونل‌های شهری در مناطقی حفاری می‌شوند که در آنها ساختمانها و تأسیسات زیربنایی موجود هستند، بنابراین در حالت کلی نبایستی ساخت تونلها، ساختمانهای مجاور، خیابانها و اماکن را بیش از حد تحت تأثیر قرار دهد. طراح ناگزیر است پیش‌بینی‌های قابل اعتمادی از نشستهای غیرقابل اجتناب توام با تونلسازی را انجام دهد. این مسأله بخش مهمی از وظیفه مهندس طراح جهت پیش‌بینی نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی در اعماق و شرایط مختلف است [میرمیرانی، ۱۳۸۰ و راست بود، ۱۳۸۴].

### ۶-۱-۱ عملیات پروژه خط ۲ متروی تبریز

طراحی و مطالعات خط ۲ قطار شهری تبریز از سال ۱۳۸۵ آغاز شد. خط ۲ قطار شهری تبریز به طول حدود ۲۲ کیلومتر از حوالی راه آهن در غرب شهر تبریز شروع شده و پس از عبور از قراملک و خیابان قره‌آغاچ (قدس) به قسمتهای میانی شهر در ناحیه بازار می‌رسد. این خط در ادامه بعد از عبور از میدان دانشسرا و زیر رودخانه مهران رود به خیابان عباسی و میدان شهید فهمیده می‌رسد. از میدان شهید فهمیده به سمت شهرک باغمیشه ادامه یافته و با تغییر مسیر به سمت جنوب شرقی در نهایت به مقابل نمایشگاه بین المللی تبریز ختم می‌شود [شرکت مهندسی مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۵].

### ۶-۲ اهداف مطالعات مکانیک خاک در محل اجرای پروژه

مطالعات انجام شده در محل با حفر ۵۱ گمانه ماشینی و ۱۵ چاهک دستی در مسیر احداث قطار شهری و در نقاط مختلف

## تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی ...

حدود ۷ سانتیمتر در سطح زمین) خواهد شد. بنابراین استفاده از تزریق، بلافاصله پس از نصب پوشش آسترهای بتنی مد نظر قرار خواهد گرفت [راست بود، ۱۳۸۴ و شرکت مهندسی مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۵].

میزان پارامتر انقباض پس از تزریق دوغاب سیمان، در بازه‌ای بین ۲/۰٪ الی ۲٪ قرار می‌گیرد که لزوم تحلیل پارامتری یا آنالیز حساسیت را برای تغییرات این پارامتر مجاب خواهد کرد.

### ۳-۴-۶ ویژگیهای زمین‌شناسی

در مقاله حاضر یک گمانه از ۵۱ گمانه‌ای که برای خط ۲ حفر گردیده انتخاب و محاسبات برای این گمانه انجام شده است. برای این گمانه (BH-10) تونل در عمق ۲۷ متری از سطح زمین حفاری خواهد شد و تغییرات آب زیر زمینی بین ۲۰ متر تا ۳۰ متر از سطح زمین اندازه‌گیری شده است. انواع خاک گمانه BH-10 (شکل ۲۱) به همراه ویژگیهای آنها در جدول ۱۱ ارائه شده است [مهندسی مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۵].

### ۱-۴-۶ اطلاعات مربوط به سپر و آسترهای بتنی

مهم‌ترین مشخصه سپرها که شرکتهای سازنده آنها گاهی به عنوان تبلیغات نیز از آن استفاده می‌کنند، قطر سپر است.

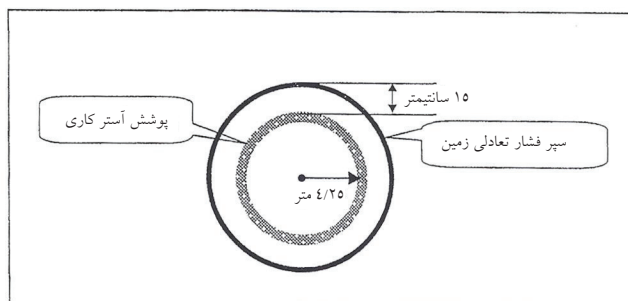
قطر حفاری سپرهای خط ۲ متروی تبریز ۹/۵ متر است. برای پوشش نگهداری تونل از قطعات بتنی پیش ساخته با ضخامت ۳۵ سانتیمتر و قطر خارجی ۹/۲ متر استفاده خواهد شد. سایر ویژگیهای مربوط به آسترکاری در جدول ۱۰ ارائه شده است [مهندسی مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۵].

### ۲-۴-۶ محاسبه پارامتر انقباض برای تونل خط ۲ متروی تبریز

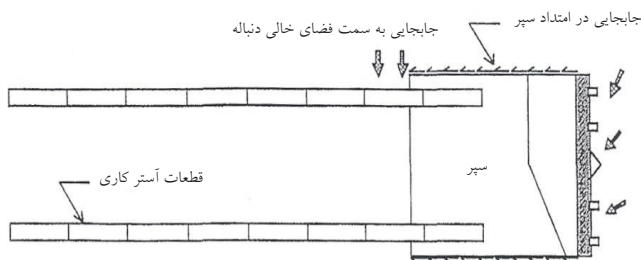
همان‌گونه که از شکل‌های شماتیک ۱۹ و ۲۰ و ابعاد ارائه شده مشخص است، فاصله‌ای به اندازه ۱۵ سانتیمتر بین سطح خارجی سپر حفاری (و یا سطح خاک حفاری شده) و سطح خارجی آسترهای بتنی موجود است و در صورتی که این فاصله توسط عملیات تزریق پر نشود، میزانی از انقباض به وجود می‌آید که موجب نشستهای بسیار بحرانی (حتی در

جدول ۱۰. ویژگیهای قطعات آسترکاری

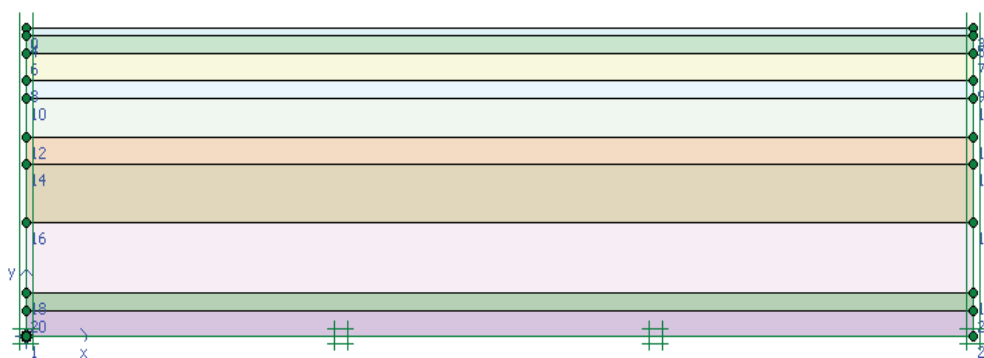
| ضریب پواسیون | وزن          | ضخامت   | سختی خمشی                   | سختی محوری            | شناسه   |
|--------------|--------------|---------|-----------------------------|-----------------------|---------|
| $\nu$        | $W$ (KN/m/m) | $d$ (m) | $EI$ (KN/m <sup>2</sup> /m) | $EA$ (KN/m)           | ID      |
| ۰/۱۵         | ۸/۴          | ۰/۳۵    | ۱/۱۲۵×۱۰ <sup>۵</sup>       | ۱/۱۰۳×۱۰ <sup>۷</sup> | Segment |



شکل ۱۹. فاصله خالی ۱۵ سانتیمتری بین خاک و آستر که با تزریق پر می‌شود



شکل ۲۰. فضای خالی دنباله، عامل اصلی نشست سطح زمین



شکل ۲۱. لایه‌های خاک و اعمال شرایط مرزی در ابعاد ۳۵×۱۲۰

جدول ۱۱. ویژگی‌های مهندسی و زمین‌شناسی لایه‌های خاکی گمانه BH-۱۰

| نام لایه | عمق (متر)     | دانسیتة خشک $\gamma_d(\text{KN/m}^3)$ | دانسیتة تر $\gamma_w(\text{KN/m}^3)$ | نفوذ پذیری $K(\text{m/day})$ | مدول الاستیسیته $E(\text{KN/m}^2)$ | ضریب پواسون $\nu$ | چسبندگی $C(\text{KN/m}^2)$ | زاویه اصطکاک $\Phi(^{\circ})$ | زاویه اتساع $\Psi(^{\circ})$ |
|----------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| CL       | ۰-۱           | ۱۳                                    | ۱۴/۵                                 | ۰/۰۴                         | ۸۵۰۰                               | ۰/۴               | ۸                          | ۲۵                            | ۰                            |
| SM       | ۱-۲/۸         | ۱۶/۲                                  | ۱۹                                   | ۰/۶                          | ۱۹۰۰۰                              | ۰/۳               | ۹                          | ۲۹                            | ۰                            |
| CL       | ۲/۸-۶         | ۱۴                                    | ۱۶                                   | ۰/۰۰۰۲۳                      | ۹۰۰۰                               | ۰/۴               | ۸                          | ۲۵                            | ۰                            |
| ML       | ۶-۸           | ۱۶/۱                                  | ۱۹/۵                                 | ۰/۰۰۱۷                       | ۱۱۰۰۰                              | ۰/۳۵              | ۱۱                         | ۲۷                            | ۰                            |
| SM       | -۱۲/۵<br>۸    | ۱۷/۴                                  | ۲۰                                   | ۰/۳۱۱                        | ۲۷۰۰۰                              | ۰/۳۳              | ۷                          | ۳۲                            | ۲                            |
| SC       | -۱۵/۵<br>۱۲/۵ | ۱۷/۵                                  | ۲۰                                   | ۰/۰۰۵۲                       | ۳۶۰۰۰                              | ۰/۳۵              | ۱۴                         | ۳۰                            | ۰                            |
| ML       | -۲۲<br>۱۵/۵   | ۱۶/۲                                  | ۲۰                                   | ۰/۰۰۴۸                       | ۱۳۰۰۰                              | ۰/۳۵              | ۱۲                         | ۲۷                            | ۰                            |
| SM       | -۳۰<br>۲۲     | ۱۷/۸                                  | ۲۰/۶                                 | ۰/۰۱۱                        | ۴۱۰۰۰                              | ۰/۳۵              | ۷                          | ۳۳                            | ۳                            |
| ML       | -۳۲<br>۳۰     | ۱۶/۴                                  | ۲۰/۴                                 | ۰/۰۰۸۵                       | ۱۶۰۰۰                              | ۰/۳۵              | ۱۳                         | ۳۰                            | ۰                            |
| CL       | > ۳۲          | ۱۵/۵                                  | ۱۹                                   | ۰/۰۰۰۶۵                      | ۱۴۰۰۰                              | ۰/۴               | ۳۰                         | ۲۲                            | ۰                            |

## ۵-۶ پیش‌بینی میزان نشست سطحی

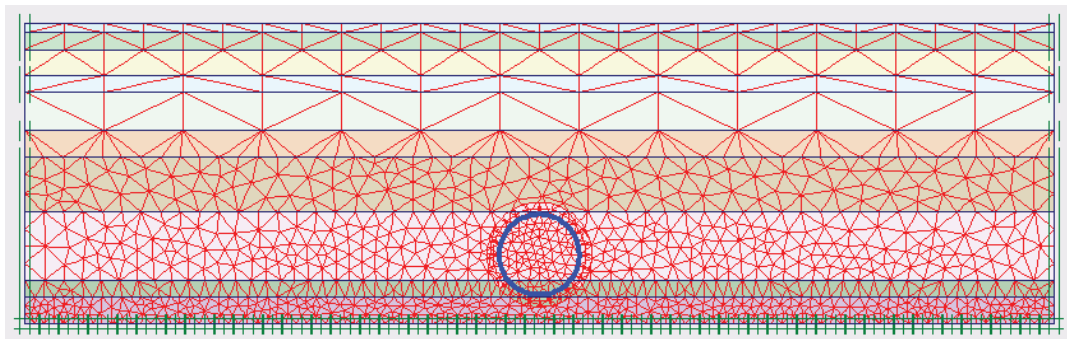
با مشخص کردن ورودی‌های لازم برای پیش‌بینی نشست سطح زمین و نهایتاً تعیین ابعاد مش‌المان محدود، مدل کردن تونل خط ۲ متروی تبریز آغاز می‌شود. تمامی تحلیل‌ها در حالت کرنش صفحه‌ای و با المانهای ۱۵ گرهی صورت پذیرفته است. نخست مدل المان محدودی به ابعاد ۳۵×۱۲۰ متر ترسیم می‌شود. با ترسیم لایه‌های مربوط به خاک، در بخش مربوط به تعیین ویژگی‌های مصالح، برای تمامی انواع لایه‌های خاک مدل موهر-کولمب به

همراه شرایط زهکشی شده وارد می‌شود. با انتخاب گزینه مربوط به طراحی تونل نخست شعاع حفاری ۴/۷۵ متر را وارد کرده و گزینه‌های مربوط به آسترکاری و فصل مشترک تونل را فعال می‌کنیم. با اعمال شرایط مرزی جابجائیهای افقی در مرزهای سمت چپ و راست و جابجائیهای افقی و قائم در کف، مدل المان محدود مقید می‌شود. پس از طی مراحل فوق، مدل حاصله مش‌بندی می‌شود. از آنجائی که احتمال تغییرات تنش و کرنش زیادی در تونل و مجاورت آن وجود دارد، مش در این نواحی

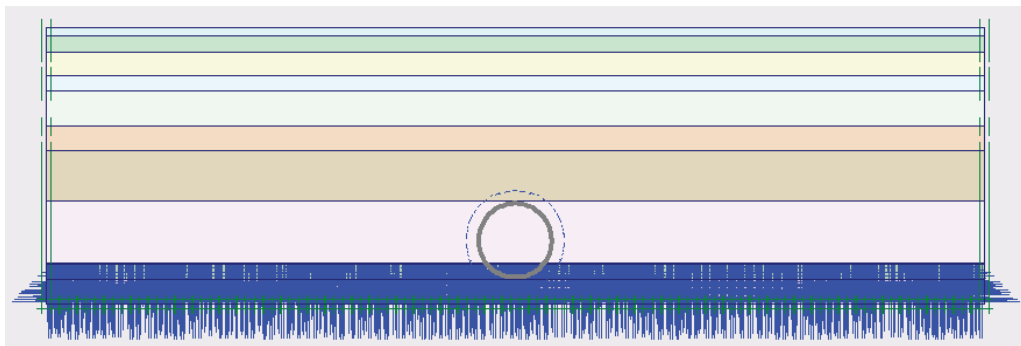
## تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی ناشی از تونلسازی ...

بتنی در داخل سپر و همزمان با عملیات حفاری انجام می‌گیرد. همچنین غیر فعال ساختن خاک داخل تونل فقط سختی و مقاومت و تنشهای مؤثر خاک را متأثر می‌سازد (شکل‌های ۲۳ و ۲۴)، بدون اینکه تغییری در فشار آب منفذی ایجاد کند، بنابراین برای حذف فشار آب داخل تونل در مدلسازی می‌بایست به طور مجزا عمل شود [راست بود، ۱۳۸۴ و شرکت مهندسی مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۵].

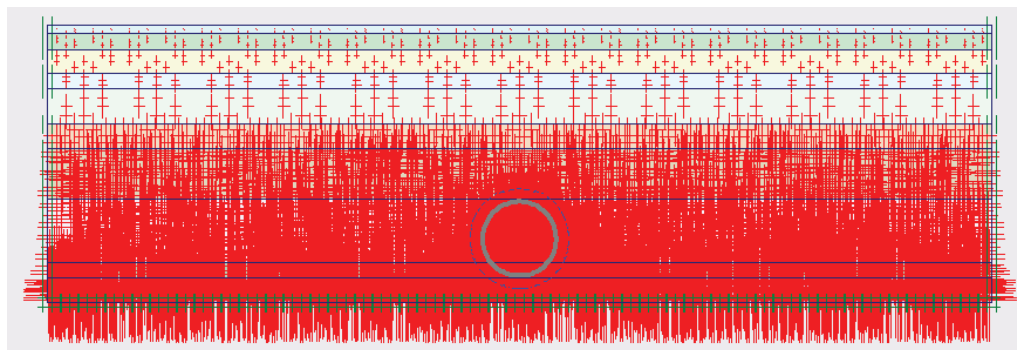
ریزتر انتخاب می‌شود. در بخش معرفی شرایط اولیه، سطح آب زیر زمینی در عمق ۳۰ متری از سطح زمین معرفی می‌شود [راست بود، ۱۳۸۴ و شرکت مهندسی مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۵]. گام بعدی مرحله حفاری و نصب آستر است. نکته مهمی که باید در این مرحله مد نظر داشت، این است که چون عملیات حفاری توسط سپر فشار تعادلی زمین صورت می‌پذیرد، عملیات نصب قطعات آسترهای



شکل ۲۲. مش المان محدود و ریز کردن المانها در مجاورت تونل



شکل ۲۳. محاسبه فشار آب منفذی برای سطح ایستایی در عمق ۳۰ متری از سطح زمین



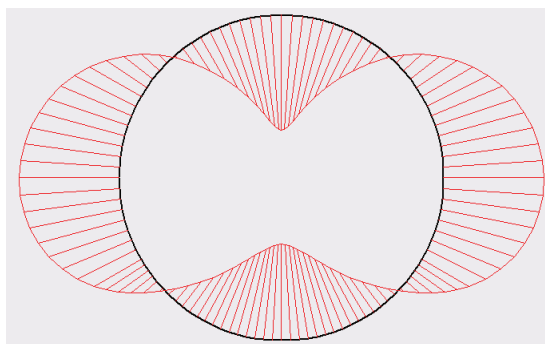
شکل ۲۴. محاسبه تنشهای مؤثر برای تونل خط ۲ متروی تبریز

نسبت به پارامتر انقباض ضروری به نظر می‌رسد، از این رو مساله از ابتدا برای مقادیر انقباض ۰/۵٪، ۰/۷۵٪، ۱٪، ۱/۲۵٪، ۱/۵٪، ۱/۷۵٪، ۲٪ حل شد و مقادیر حاصله برای میزان نشست سطحی در جدول ۱۲ و اشکال ۲۹ و ۳۰ نشان داده شده است. با توجه به این جداول و اشکال، بیشینه میزان نشست سطح زمین برای سطح آب زیر زمینی ۳۰ متری از ۱۲/۲۹ میلی‌متر برای پارامتر انقباض ۰/۵٪ تا ۳۱/۷۹۵ میلی‌متر برای پارامتر انقباض ۲٪ در حال افزایش است.

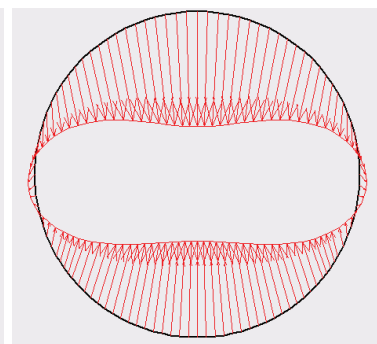
با تکمیل مرحله محاسبات و قرار دادن درصد انقباض برابر ۱٪ و حل مساله نتایج حاصله به قرار زیر است:

بیشینه جابجایی برابر ۵۶/۰۴ میلی‌متر در تاج تونل (شکل ۲۵) بیشینه ممان خمشی آستر تونل برابر ۴۶۶۳۸ کیلو نیوتن متر بر متر (شکل ۲۶) بیشینه نیروی برشی آستر تونل برابر ۲۰۷/۸۹ کیلو نیوتن بر متر (شکل ۲۷) بیشینه نیروی محوری آستر تونل برابر ۱/۴۲×۱۰<sup>۳</sup> کیلو نیوتن بر متر (شکل ۲۸)

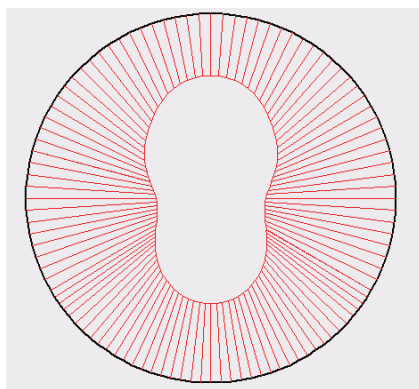
همان طور که در ابتدا نیز عنوان شد، لزوم یک بررسی پارامتری



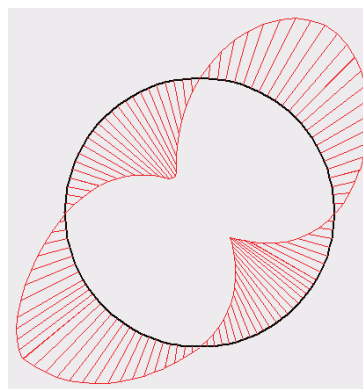
شکل ۲۶. توزیع ممانهای خمشی



شکل ۲۵. بیشینه جابجایی قائم در تاج تونل



شکل ۲۸. توزیع نیروهای محوری



شکل ۲۷. توزیع نیروهای برشی

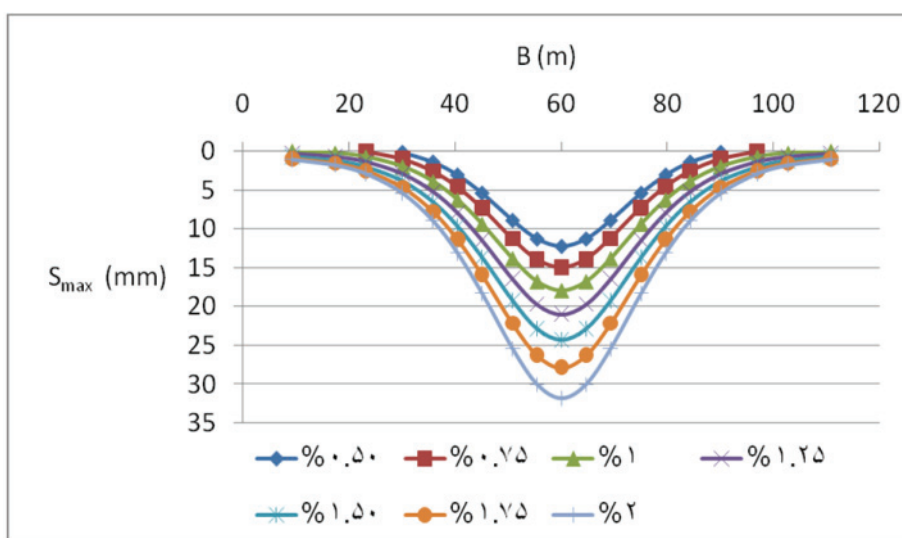
جدول ۱۲. مقادیر نشست سطحی زمین برای مقدار پارامتر انقباض ۰/۵٪ و ۲٪ و سطح آب زیر زمینی ۳۰ متری

| B (m)               | ۶۰     | ۶۴/۶۲  | ۶۹/۲۳  | ۷۵     | ۷۹/۶۲  | ۸۴/۲۳ | ۹۰    | ۹۶/۹۲ | ۱۰۲/۷ | ۱۱۰/۸ |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $S_{max}$ (mm)      | ۱۲/۲۹۱ | ۱۱/۳۳۳ | ۸/۹۴۰  | ۵/۴۲۳  | ۳/۰۸۰  | ۱/۴۱۵ | ۰/۱۶۵ | -     | -     | -     |
| پارامتر انقباض ۰/۵٪ |        |        |        |        |        |       |       |       |       |       |
| $S_{max}$ (mm)      | ۳۱/۷۹۵ | ۳۰/۰۱۱ | ۲۵/۴۳۹ | ۱۸/۳۲۴ | ۱۳/۱۵۴ | ۹/۰۲۹ | ۵/۴۵۳ | ۲/۹۶۲ | ۱/۸۶۶ | ۱/۱۴۹ |
| پارامتر انقباض ۲٪   |        |        |        |        |        |       |       |       |       |       |

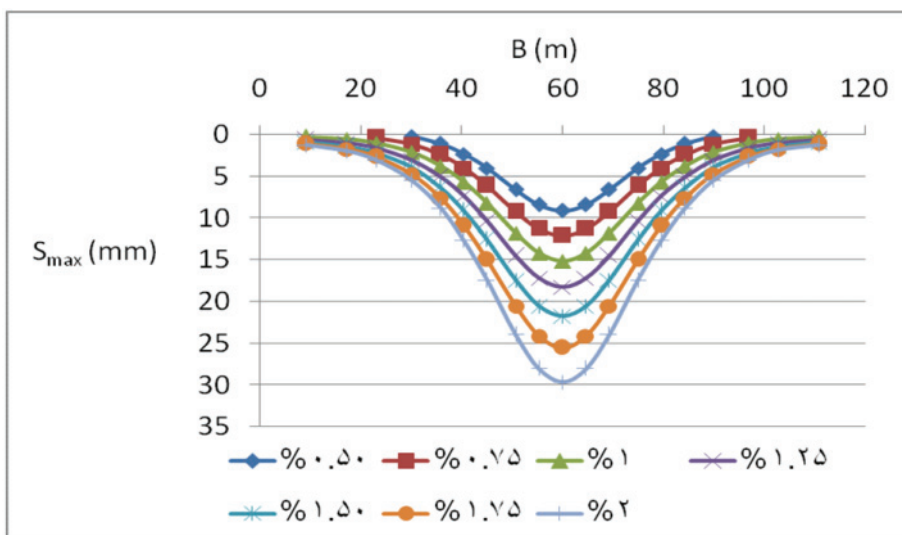
تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی ...

جدول ۱۳. مقادیر نشست سطحی زمین برای مقادیر پارامتر انقباض ۰/۵٪ و ۲٪ و سطح آب زیر زمینی ۲۰ متری

| B (m)                                 | ۶۰     | ۶۴/۶۲  | ۶۹/۲۳  | ۷۵     | ۷۹/۶۲  | ۸۴/۲۳ | ۹۰    | ۹۶/۹۲ | ۱۰۲/۷ | ۱۱۰/۸ |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $S_{max}$ (mm)<br>پارامتر انقباض ۰/۵٪ | ۹/۱۴۰  | ۸/۴۲۵  | ۶/۶۴۱  | ۴/۰۴۷  | ۲/۳۴۲  | ۱/۱۳۵ | ۰/۲۲۶ | -     | -     | -     |
| $S_{max}$ (mm)<br>پارامتر انقباض ۲٪   | ۲۹/۶۴۷ | ۲۸/۰۵۸ | ۲۳/۹۴۹ | ۱۷/۴۷۹ | ۱۲/۷۱۲ | ۸/۸۶۲ | ۵/۴۷۰ | ۳/۰۶۸ | ۱/۹۹۲ | ۱/۲۶۷ |



شکل ۲۹. پروفیل نشست سطحی زمین برای مقادیر مختلف پارامتر انقباض و سطح آب زیر زمینی ۳۰ متری



شکل ۳۰. پروفیل نشست سطحی زمین برای مقادیر مختلف پارامتر انقباض و سطح آب زیر زمینی ۲۰ متری

همان طور که در اشکال ۲۹ و ۳۰ دیده می‌شود با پائین آمدن کیفیت و راندمان تزریق و به عبارتی با بیشتر شدن مقادیر پارامتر انقباض مقدار نشست در سطح زمین افزایش می‌یابد. در شکل ۲۹ پروفیل نشست سطحی زمین برای مقادیر پارامتر انقباض از ۰/۵٪ تا ۲٪ برای سطح آب زیر زمینی ۳۰ متری رسم شده است. مقادیر بیشینه نشست سطح زمین از ۱۲/۲۹۱ میلی‌متر برای پارامتر انقباض ۰/۵٪ تا ۳۱/۷۹۵ میلی‌متر برای پارامتر انقباض ۲٪ افزایش یافته است. همچنین بیشینه نشست در تاج تونل برای حالت سطح آب زیر زمینی در ۳۰ متری برای مقادیر پارامتر انقباض مختلف از ۲۹/۱۴ میلی‌متر تا ۹۰/۹۵ میلی‌متر تغییر کرده است. روند تغییرات مقدار نسبت نشست برای حالت سطح آب زیر زمینی در حالت ۲۰ متری نیز از مقدار ۰/۲۴۲ برای پارامتر انقباض ۰/۵٪ تا ۰/۳۵۶ برای پارامتر انقباض ۲٪ به دست آمده است. همان گونه که در جداول ۱۴ و ۱۵ و اشکال ۳۱ و ۳۲ مشاهده می‌شود، با بالا آمدن آب زیر زمینی از ۳۰ متری به ۲۰ متری، مقادیر نشست در سطح زمین و در تاج تونل اندکی کاهش می‌یابد که میزان این کاهش در محور تونل در پارامتر انقباض ۰/۵٪ برای نشست در سطح زمین و تاج تونل به ترتیب برابر ۲۵/۶۳٪ و ۳/۶۵٪ است و در پارامتر انقباض ۲٪ میزان این کاهش در محور تونل برای نشست در سطح زمین و تاج تونل به ترتیب برابر ۱۲/۹۵٪ و ۷/۶۳٪ است و در پارامتر انقباض ۲٪ میزان این کاهش در محور تونل برای نشست در سطح زمین و تاج تونل به ترتیب برابر ۶/۷۵٪ و ۹/۳۳٪ است.

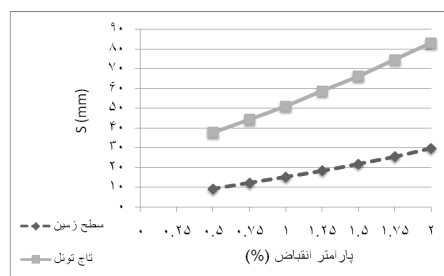
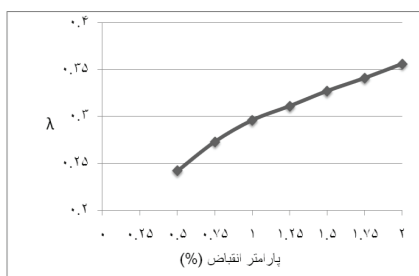
جدول ۱۴. مقادیر بیشینه نشست سطح زمین و تاج تونل برای سطح آب زیر زمینی ۲۰ متری

| پارامتر انقباض (درصد) | ۰/۵   | ۰/۷۵   | ۱      | ۱/۲۵   | ۱/۵    | ۱/۷۵   | ۲      |
|-----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| نشست سطح زمین         | ۹/۱۴۰ | ۱۲/۱۳۲ | ۱۵/۱۵۱ | ۱۸/۲۸۱ | ۲۱/۷۵۵ | ۲۵/۵۱۳ | ۲۹/۶۴۷ |
| نشست تاج تونل         | ۳۷/۷۱ | ۴۴/۳۶  | ۵۱/۱۱  | ۵۸/۷۵  | ۶۶/۳۳  | ۷۴/۶۸  | ۸۳/۱۰  |
| نسبت نشست             | ۰/۲۴۲ | ۰/۲۷۳  | ۰/۲۹۶  | ۰/۳۱۱  | ۰/۳۲۷  | ۰/۳۴۱  | ۰/۳۵۶  |

جدول ۱۵. مقادیر بیشینه نشست سطح زمین و تاج تونل برای سطح آب زیر زمینی ۳۰ متری

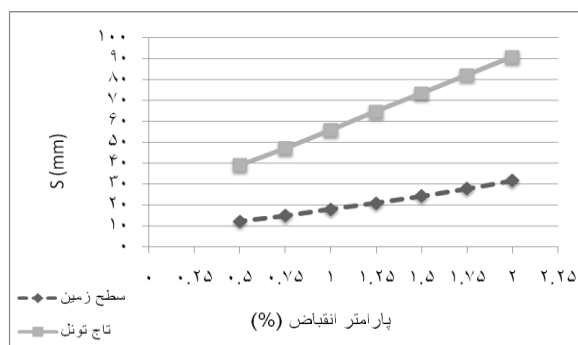
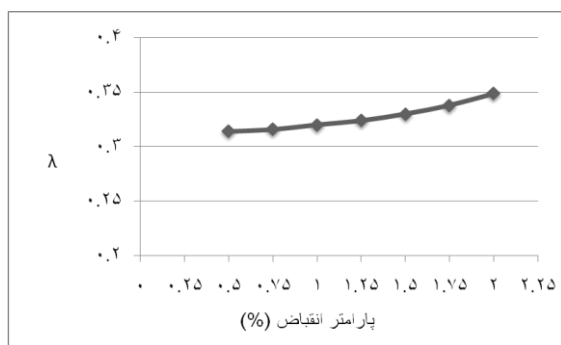
| پارامتر انقباض (درصد) | ۰/۵    | ۰/۷۵   | ۱      | ۱/۲۵   | ۱/۵    | ۱/۷۵   | ۲      |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| نشست سطح زمین         | ۱۲/۲۹۱ | ۱۴/۹۶۲ | ۱۷/۹۶۷ | ۲۱/۰۰۱ | ۲۴/۲۹۸ | ۲۷/۸۶۷ | ۳۱/۷۹۵ |
| نشست تاج تونل         | ۳۹/۱۴  | ۴۷/۲۸  | ۵۶/۰۴  | ۶۴/۸۰  | ۷۳/۶۰  | ۸۲/۳۲  | ۹۰/۹۵  |
| نسبت نشست             | ۰/۳۱۴  | ۰/۳۱۶  | ۰/۳۲۰  | ۰/۳۲۴  | ۰/۳۳۰  | ۰/۳۳۸  | ۰/۳۴۹  |

شکل ۳۱. نمودار تغییرات نشست و نسبت نشست و پارامتر انقباض برای سطح آب زیر زمینی ۲۰ متری



شکل ۳۱. نمودار تغییرات نشست و نسبت نشست و پارامتر انقباض برای سطح آب زیر زمینی ۲۰ متری





شکل ۳۲. نمودار تغییرات نشست و نسبت نشست و پارامتر انقباض برای سطح آب زیر زمینی ۳۰ متری

۵- با افزایش قطر و عمق تونل مقدار نشست در تاج تونل و سطح زمین افزایش می‌یابد، اما در تونلهای عمیق تر، از آنجا که نشستهای ایجاد شده در تاج تونل تا سطح زمین در فاصله بیشتری مستهلک می‌شود، تأثیر حفر تونل در سطح زمین کمتر مشهود است. افزایش مقادیر نشستها در اثر افزایش عمق تونل به علت افزایش وزن سربرار در بالای تاج تونل است.

۶- در مواردی که تونل در خاکهای سست حفر می‌شود، امکان ریزش خاک از دیواره‌ها و جبهه تونل بسیار زیاد است. در این گونه موارد می‌توان با بکار بردن پوشش، تغییر مکانهای خاک را کنترل کرد. به طور کلی در زمینه تونلهای پوشش دار نتایج زیر به دست آمده است:

۶-۱- به نظر می‌رسد مهم ترین عامل در کنترل تغییر شکلهای کوتاه مدت خاک پارامتر تغییر شکل مجاز (گپ) است. در حالتی که تونل اجازه هیچ گونه تغییر شکلی را ندارد نشست کوتاه مدت ناچیز است و نیروهای وارد بر جدار در این حالت بیشترین مقدار را دارند.

۶-۲- با افزایش ضخامت پوشش، صلبیت پوشش، افزایش و در نتیجه نشستهای کوتاه مدت خاک کاهش می‌یابند.

۶-۳- نفوذ پذیری پوشش تأثیری در نشست کوتاه مدت خاک ندارد.

۷- هدف اصلی از بحث ارائه شده در قسمت پیش‌بینی نشست خط ۲ متروی تبریز، بررسی تأثیر عوامل محیطی از قبیل تغییر سطح آب زیر زمینی و کیفیت عملیات ساخت تونل روی میزان

## ۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این محاسبات تأثیر عوامل مؤثر فیزیکی مثل  $\gamma$  (ضریب پواسون)،  $E$  (مدول الاستیسیته)،  $\gamma$  (وزن واحد خاک)، و نیز تأثیر عوامل هندسی مثل  $D$  (قطر تونل)،  $Z_0$  (عمق تونل)،  $B$  (عرض مدل خاکی در برنامه محاسباتی) و  $H_p$  (عمق لایه خاک زیر تونل) مورد بررسی قرار گرفت و برای هر کدام از حالتها نمودار تغییرات نشست در سطح زمین و تاج تونل ترسیم و مقادیر نسبت نشست (نسبت نشست بیشینه در سطح زمین به نشست در تاج تونل) محاسبه شد. از آنجا که فرم منحنی نشست در سطح زمین برای تمام موارد از یک الگو تبعیت می‌کند، از ارائه نمودارهای توزیع نشست در سطح زمین چشم پوشی گردید. بر اساس تحلیل‌های انجام شده می‌توان نتایج کلی زیر را ذکر کرد:

۱- با افزایش  $E$  خاک، مقادیر نشست در سطح زمین و در تاج تونل کاهش می‌یابد، به طوری که با ۱۰ برابر شدن  $E$ ، مقادیر نشست ۰/۱ برابر می‌شوند.

۲- با افزایش  $\gamma$  خاک، مقادیر نشست کوتاه مدت خاک در سطح زمین و در تاج تونل افزایش می‌یابند.

۳- کاهش  $\gamma$  خاک، سبب کاهش مقدار نشستها در سطح زمین و در تاج تونل می‌شود.

۴- با افزایش مقدار ضریب نفوذ پذیری خاک مقدار نشست کوتاه مدت تغییری نمی‌کند. آشکار است که ضریب نفوذ پذیری خاک فقط بر سرعت رسیدن به نشست نهایی اثر گذار است و نه بر مقدار آن.

## ۹. مراجع

- میرمیرانی، شهریار (۱۳۸۰) "تحلیل نشست زمین در اثر حفر تونلهای مترو"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

- شریعتمداری، ن. و فرزانه، الف. (۱۳۸۰) "بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل مترو در تهران"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس تونل ایران، تهران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ص. ۲۷۶-۲۶۵.

- وفائیان، م. (۱۳۸۰) "ویژگیهای نشست زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس تونل ایران، تهران، ص. ۳۲۱-۳۱۳.

- بهپور گوهری، م.، روحی مهر، الف. و وفائی پور، ر. (۱۳۸۵) "مرجع کامل V8 PLAXIS"، انتشارات فروزش، تبریز.

- جعفر پیشه، ش. (۱۳۸۳) "تحلیل عددی نشستهای زمانی خاک در اثر حفر تونلهای کم عمق"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان.

- شفیع، ح. ر. (۱۳۸۵) "بررسی نشست زمین بر اثر حفر تونل مترو در اصفهان"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز.

- راست بود، ب. (۱۳۸۴) "پیش‌بینی نشست سطح زمین ناشی از حفاری تونل در مناطق شهری"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید باهنر کرمان.

- شرکت مهندسین مشاور ایمن سازان (۱۳۸۵) "گزارش تحقیقات و مطالعات ژئوتکنیک خط ۲ متروی تبریز"، شرکت مهندسین مشاور ایمن سازان.

- درویش زاده، ع. (۱۳۷۰) "زمین شناسی ایران"، انتشارات سپهر، چاپ اول، تهران.

نشست سطح زمین است. کیفیت عملیات ساخت تونل خود را در پارامتر انقباض نشان می‌دهد، زیرا اگر عملیات تزریق با راندمان بالا و بموقع صورت پذیرد، نتیجه آن کاهش میزان انقباض تونل خواهد بود. میزان پارامتر انقباض پس از تزریق دوغاب سیمان، در بازه‌ای بین ۰/۲٪ الی ۲٪ قرار می‌گیرد، که لزوم تحلیل پارامتری یا آنالیز حساسیت را برای تغییرات این پارامتر موجب خواهد کرد، از این رو مساله برای مقادیر انقباض ۰/۵٪، ۰/۷۵٪، ۱٪، ۱/۲۵٪، ۱/۵٪، ۱/۷۵٪ و ۲٪ حل شد و نتایج زیر به دست آمد:

۷-۱- بیشینه نشست سطحی در راستای خط مرکزی تونل در سطح زمین حادث می‌شود، اما بیشترین میزان نرخ جابجایی در کل مدل مربوط به تاج تونل است که میزان آن از بیشینه نشست سطحی بیشتر است. بنابراین انتظار می‌رود که در حالت کلی سازه‌های زیر سطحی تحت جابجاییهای بیشتری نسبت به سازه‌های سطحی در اثر حفاری تونل قرار گیرند.

۷-۲- بیشینه میزان نشست برای سطح ایستایی ۲۰ متری از ۹/۱۴ تا ۲۹/۶۴۷ میلیمتر و برای سطح ایستایی ۳۰ متری از ۱۲/۲۹۱ تا ۳۱/۷۹۵ میلیمتر متغیر خواهد بود.

۷-۳- کاهش سطح ایستایی منجر به افزایش در میزان نشست سطح زمین می‌شود.

۷-۴- با کاهش سطح ایستایی و با فاصله گرفتن از خط مرکزی تونل مقادیر نشست سطحی با شیب کمتری کاهش پیدا می‌کنند.

۷-۵- با افزایش میزان پارامتر انقباض، مقدار نشست نیز افزایش می‌یابد که مقدار رشد این افزایش در سطح ایستایی ۲۰ متری بیشتر از سطح ایستایی ۳۰ متری است.

## ۸. سپاسگزاری

از شرکت مهندسین مشاور ایمن سازان، به جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات فنی و مکانیکی خط ۲ متروی کلانشهر تبریز و همچنین اطلاعات ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه، سپاسگزاری بسیار می‌شود.

## تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی ...

شفیعی خیر آبادی، ر. (۱۳۸۵) "پیش‌بینی نشست زمین با روش المان محدود با استفاده از نرم افزار Plaxis"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید باهنر کرمان.

- Brinkgreve, R. B. J. and Vermeer, P.A. (2002) "PLAXIS Manual Version 8", Balkma, Rotterdam.

- Lee, C. J., Wu, B. R. and Chiou, S. Y. (1999) "Soil movements around a tunnel in soft soils", Proceedings, National Science Council, ROC (A), Vol.23, No.2, pp.235-247.

- Loganathan, N. and Poulos, H.G. (1998) "Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clay", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., Vol.124, No.9, pp.846-856.

- Mair, R. J., Taylor, R. N. and Bracegirdle, A. (1993) "Surface settlement profiles above tunnels in clay", Geotechnique, Vol.43, No.2. pp.315-320.

- Peck, R. B. (1969) "Deep excavation and tunneling in soft ground", Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, State-of-the-Art Volume, pp.225-290.

- Rowe, R. K. and Kack, G. J. (1983) "A theoretical examination of the settlements induced by tunneling", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp.299-314.

- Sagaseta, C. (1987) "Analysis of underground soil deformation duo to ground loss", Geotechnique, Vol.37, No.3 pp.301-330.

- Verruijt, A. and Booker, J. R. (1996) "Surface settlement duo to deformation of a tunnel in an elastic half plane", Geotechnique, Vol.46, No.4, pp. 753-756.