فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
زمستان ۱۳۸۶، شماره‌ی چهلم، ص. ۶۱-۶۹، (یادداشت فنّی)

بررسی تأثیر متقابل حفاری تونل‌های کم‌عمق شهری و گودبرداری سازه‌های بزرگ سطحی

محمدحسین صدقیانی (استادیار)
شیما الیاسی(کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار، به‌منظور بررسی رفتار و اثر متقابل حفاری تونل در عمق‌های متفاوت زیرزمین و گودبرداری سازه‌های سطحی از لحاظ پایداری در حین اجرا و بهره‌برداری و تغییرشکل‌ها و جابجایی‌های ایجاد شده در سطح زمین، بخش‌های شمالی خط ۱ مترو تهران (حد فاصل بین ایستگاه‌های R۱ و T۱) به‌عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام تحلیل‌های عددی در این پژوهش از نرم‌افزار اجزاء محدود (PLAXIS) استفاده شده است. مدل‌سازی شامل حفاری و اجرای تونل و گودبرداری ساختمان است. اجرای تونل به‌روش «حفاری چندمرحله‌یی مقطع» (روش نوین تونلزنی اتریشی، NATM) و در سه مرحله‌ی اصلی انجام می‌گیرد. ابتدا فضای بالای تونل به دو بخش تقسیم شده و در دو مرحله حفاری شده و سیستم نگه‌دارنده نصب می‌شود، و سپس بخش پائینی تونل اجرا می‌شود. از یک پوسته‌ی شاتکریت که به‌وسیله‌ی پروفیل‌های فلزی و شبکه‌ی تور فولادی مسلح شده به‌عنوان نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل، و از پوشش بتنی به‌ضخامت ۴۰ سانتی‌متر به‌عنوان نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل استفاده شده است. گود ساختمانی نیز با دیوار دیافراگم و پشت‌بندهای افقی مدل شده و بار ناشی از ساختمان در کف گود به‌صورت باری گسترده اعمال می‌شود. در نهایت پارامترهایی از قبیل عرض و عمق گود، فاصله‌ی لبه‌ی گود از تاج تونل، عمق روباره‌ی تونل، سطح آب زیرزمینی، مشخصات نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل و تقدم و تأخر زمانی اجرای تونل و گودبرداری ساختمان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و اثر آنها بر تغییر مکان افقی دیواره‌ی گود، تغییرشکل سطح زمین در بالای تاج تونل، نشست لبه‌ی گود، تغییرشکل نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل، توزیع تنش در اطراف تونل و گود، توزیع نقاط خمیری در اطراف تونل و گود بررسی می‌شود. سپس نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها از نظر میزان کنترل تغییرشکل‌ها در محیط اطراف مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

مقدمه

در شهرهای پرجمعیت، مانند تهران، مترو نقش مهمی در جابه‌جایی مسافران ایفا می‌کند. در مناطق پرجمعیت شهری مسیر تونل‌های مترو به‌ناچار از زیر ساختمان‌های موجود عبور می‌کند که در بعضی موارد فاصله‌ی بین تاج تونل و پی ساختمان بسیار کم است. در صورتی که حفاری تونل با کنترل انجام نگیرد باعث ایجاد جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌هایی در سطح زمین شده و آسیب‌های سازه‌یی بر ساختمان‌های اطراف و تونل وارد می‌کند. تغییرشکل زمین با تنش آزاد شده در زیر زمین بر اثر حفاری یا تحکیم خاک به علت پایین رفتن سطح آب زیرزمینی ارتباط مستقیم دارد.

در صورت وجود آب زیرزمینی، حفاری تونل با مشکلات ناشی از ورود آب به داخل تونل مواجه می‌شود. به‌علاوه خروج آب باعث پایین آمدن سطح آب زیرزمینی و تحکیم خاک شده و در سطح زمین نشست حاصل می‌شود. بنابراین در طول انجام پروژه سطح آب نباید چندان تغییر کند. این مسئله بر انتخاب روش ساخت تأثیر زیادی دارد.

از سوی دیگر، در اثر حفاری در زیر زمین، تنش‌های موجود در زمین آزاد شده و توده‌ی سنگ و خاک اطراف تونل به سمت داخل تونل حرکت می‌کند و باعث نشست سطح زمین می‌شود. تغییرشکل سطح زمین موجب وارد شدن آسیب‌های سازه‌یی به ساختمان‌های موجود در مجاورت تونل می‌شود. همچنین در سازه‌های با پی‌های عمیق مانند شمع، امکان ایجاد جابه‌جایی‌های افقی در شمع‌ها ممکن است خطرناک باشد. به‌منظور کاهش این آسیب‌های سازه‌یی، لازم است در اجرای تونل از روش‌های فنی-اجرایی به‌منظور محدودکردن تغییرشکل زمین به‌میزان قابل قبول استفاده شود.[۱]

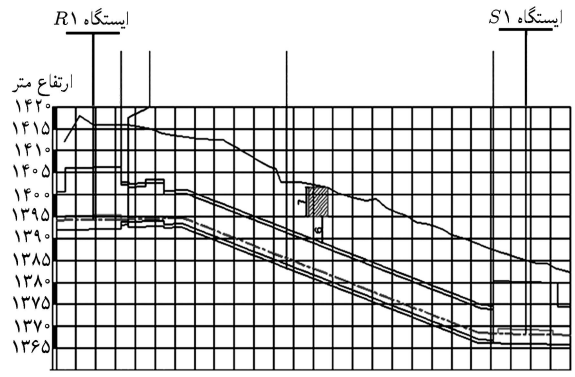
در این پژوهش برای بررسی جامع اثر متقابل اجرای دو سازه‌ی زیرزمینی و سطحی از پارامترهای مختلف (از جمله تقدم و تأخر اجرای هر سازه نسبت به هم، تراز آب زیرزمینی، هندسه‌ی گودبرداری و حالات مختلف اجرایی) به‌عنوان پارامترهای متغیر در طول مسیر استفاده شده است. برای انجام مطالعات حساسیت پارامترهای مربوطه از نرم‌افزار اجزاء محدود PLAXIS استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های

این نرم‌افزار امکان مدل‌سازی کلیه‌ی مراحل اجرایی در برنامه و در یک اجرای نرم‌افزار است. همچنین با توجه به این که اثر و مقدار بار اعمال شده از خاک به پوشش‌های اولیه و نهایی در مراحل مختلف می‌تواند متفاوت باشد در مدل‌سازی نیز می‌توان این حالت را با گزینه‌ی «ضریب توزیع بار» ($\sum Mstage$) لحاظ کرد.

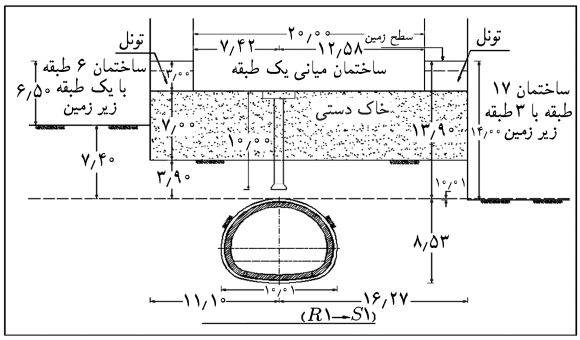
مشخصات محل

در این تحقیق اثر متقابل اجرای تونل‌های کم‌عمق و گودبرداری‌ها در مناطق شهری بررسی شده است. برای بررسی، تونل در توسعه‌ی خط یک متروی تهران بین ایستگاه‌های R۱ و S۱ انتخاب شده است. در شکل ۱ مشخصه‌ی طولی مسیر تونل در فاصله‌ی بین ایستگاه‌های R۱ و S۱ نشان داده شده است. وجود یک گود ساختمانی به‌عمق ۷ متر و طول حدود ۴۰ متر درفاصله‌ی ۶ متری از تاج تونل در این شکل مشاهده می‌شود. در شکل ۲ نمونه‌یی از مقطع تونل در فاصله‌ی بین ایستگاه‌های R۱ و S۱ نشان داده شده است. در این شکل نیز وجود چند ساختمان بلند با گودهای عمیق در فاصله‌ی کمی از تاج تونل مشاهده می‌شود.

بنابراین با توجه به شرایط موجود در مسیر پروژه و وجود مقاطع بحرانی در مسیر، بررسی و مطالعه‌ی اثر متقابل حفاری و اجرای تونل و گودبرداری ساختمان در حالت‌های مختلف ضروری بوده و اهمیت کاربردی دارد.[۲و۳]



شکل ۱. مشخصه‌ی طولی مسیر تونل در فاصله‌ی بین ایستگاه‌های R۱ و S۱.[۲و۳]



شکل ۲. مقطعی از مسیر تونل در فاصله‌ی بین ایستگاه‌های R۱ و S۱.[۲و۳]

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک.[۲و۳]

پارامترهای خاک	مقادیر
نوع خاک (GC)	شن رسی با ماسه و قلوه‌سنگ
وزن مخصوص مؤثر	$\bar{\gamma}_{sub} = ۱۲/۹(\mathrm{KN/m^۳})$
وزن مخصوص خشک	$\bar{\gamma}_d = ۲۰/۷(\mathrm{KN/m^۳})$
چگالی	$\bar{G}_s = ۲/۶۷$
ضریب تغییر شکل‌پذیری	$\bar{E} = ۸۵۰۰(۱۰ + D)$ $(KN/m^۲), D \leq ۱۵(۱۰ + D)$ $(KN/m^۲), D \leq m$
حد روانی (LL)	$LL = ۳۳$
حد خمیری (PL)	$PL = ۲۰$
ضریب پواسون خاک	$\bar{\mu} = ۰/۳$
زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	$\varphi = ۴۲ - ۴۵$
چسبندگی خاک	$C = ۱۰ - ۲۵\mathrm{KPa}$

مشخصات ژئوتکنیکی محدوده‌ی مورد مطالعه

بافت حاکم خاک شن رس‌دار همراه با ماسه است. خاک دارای لایه‌بندی تقریباً یکنواخت است و پارامترهای آن در جدول ۱ ارائه شده است. مدل رفتاری خاک مطابق مدل موریکولمب انتخاب شده است. به‌دلیل تشکیل نقاط پلاستیک در خاک این مدل رفتاری مناسب به‌نظر می‌رسد.

شرایط آب زیرزمینی در مسیر

موقعیت سطح آب زیرزمینی در محدوده‌ی ایستگاه‌های R۱ و S۱ در شکل ۱ با خط چین نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که سطح آب زیرزمینی از پایین مقطع تونل عبور می‌کند. در مدل‌سازی، سطح آب زیرزمینی در دو موقعیت بالای تاج تونل و در کف تونل بررسی شده است.[۲و۳]

مشخصات هندسی مدل

سربار خاک روی تونل در طول مسیر حدود ۱۵ متر و در بخش کوچکی از آن ۸ متر است. شکل هندسی مقطع تونل نیز براساس نقشه‌های نوع طرح موجود انتخاب شده است. تونل دارای مقطع نعل اسبی به ارتفاع حدود ۸/۵ متر و عرض ۱۰ متر است. اجرای تونل به‌روش حفاری چندمرحله‌یی مقطع (براساس روش تونل‌زنی جدید اتریشی NATM) و در سه مرحله‌ی اصلی انجام می‌شود. ابتدا فضای بالای تونل به دو بخش تقسیم، و در دو مرحله حفاری می‌شود و سیستم نگه‌دارنده نصب

جدول ۲. مشخصات نگه‌دارنده‌ی اولیه و نهایی تونل.[۲و۳]

سیستم نگه‌دارنده		$EA(KN/m)$ مدول محوری مقطع	$EI(KNm^2/m)$ مدول خمشی مقطع	$d(m)$ ضخامت پوشش بتنی	ν
نگه‌دارنده اولیه	$IPE18@1m$ شاتکریت+	$4/78E5$	۲۶۴۰		۰/۳
	$IPE18@0/5m$ شاتکریت+	$9/56E5$	۵۲۸۰		۰/۳
	$IPE20@0/5m$ شاتکریت+	$11/4E5$	۷۷۶۰		۰/۳
نگه‌دارنده نهایی	پوشش بتنی	$8/4E5$	$1/1E5$	۰/۴	۰/۲
پوشش کف تونل	پوشش بتنی	14/7E5	6E5	۰/۷	۰/۲

می‌شود. سپس بخش پائینی تونل اجرا می‌شود. با توجه به سربارکم موجود، لازم است یک حائل سخت که تغییرشکل‌ها و تنش‌ها را محدود کند طراحی شود. بنابراین نگه‌دارنده اولیه یک پوسته‌ی شاتکریت است که به‌وسیله‌ی پروفیل‌های فلزی مسلح شده است و نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل، پوشش بتنی به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر است. برای ایجاد صلبیت کافی در کف تونل از بتن به‌ضخامت ۷۰ سانتی‌متر به‌عنوان مجموعه‌ی نگه‌دارنده‌ی اولیه و نهایی استفاده می‌شود. مشخصات نگه‌دارنده‌ی اولیه و نهایی تونل در جدول ۲ آورده شده است.

دیواره‌های گود که به‌صورت دیوار دیافراگم‌اند، در فایل ورودی با المان‌های تیر مدل می‌شوند. متناسب با عمق گود نیز یک یا دو پشت‌بند به فواصل ۵ متر در جهت عمود بر صفحه بین دو دیواره‌ی گود گذاشته می‌شود. پشت‌بندها با المان مهاری مدل می‌شوند. مشخصات دیوار دیافراگم و پشت‌بندها در جدول ۳ نشان داده شده است.

یادآور می‌شویم که اعداد ارائه شده در جداول ۲ و ۳ براساس مشخصات مصالح به‌کار رفته در پروژه است. بارگذاری کف گود در جهت کاهش اثرگودبرداری در کف و ترخیص بیش از حد تنش، به‌صورت یک بارگسترده و به بزرگی ۲۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع اعمال می‌شود.

مراحل تحلیل

پس از ساخت مدل‌های مربوط به حالت‌های مختلف گودبرداری از لحاظ ابعاد و فاصله از تاج تونل برای عمق‌های مختلف تونل، مراحل تحلیل به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

جدول ۳. مشخصات دیوار دیافراگم و بست‌ها.

مشخصات دیوار دیافراگم	ضخامت دیوار (m)	ضریب پواسون	مدول‌الاستیسیته (kg/cm^2)
	۰/۴	۰/۲	$0/6E5$
مشخصات بست‌ها	مقاومت کششی (N)	فاصله‌ی بین بست‌ها (m)	سطح مقطع (m^2)
	$1E12$	۵	۰/۰۱

- اجرای گودبرداری به‌عمق ۳ متر، اجرای دیوار دیافراگم و مهاری‌های مربوطه؛
- اجرای گودبرداری به‌عمق ۳ متر (مرحله دوم)؛
- اجرای گودبرداری به‌عمق ۳ متر (مرحله سوم) و اجرای مهاری وسط گود (برای گودهای با عمق ۹ متر و بیشتر)؛
- بارگذاری کف گود؛
- حفاری بخش ۱ تونل و اجرای نگه‌دارنده‌ی اولیه (با این فرض که $\sum Mstage = ۰/۶$)؛
- حفاری بخش ۲ تونل، تخریب نگه‌دارنده بین دو بخش فوقانی تونل و اجرای نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی دیواره‌ی سمت چپ تونل (با این فرض که $\sum Mstage = ۰/۶$)؛
- حفاری بخش ۳ تونل و اجرای نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی کف تونل $(\sum Mstage = ۰/۶)$؛
- اجرای پوشش نهایی تونل $(\sum Mstage = ۱)$.

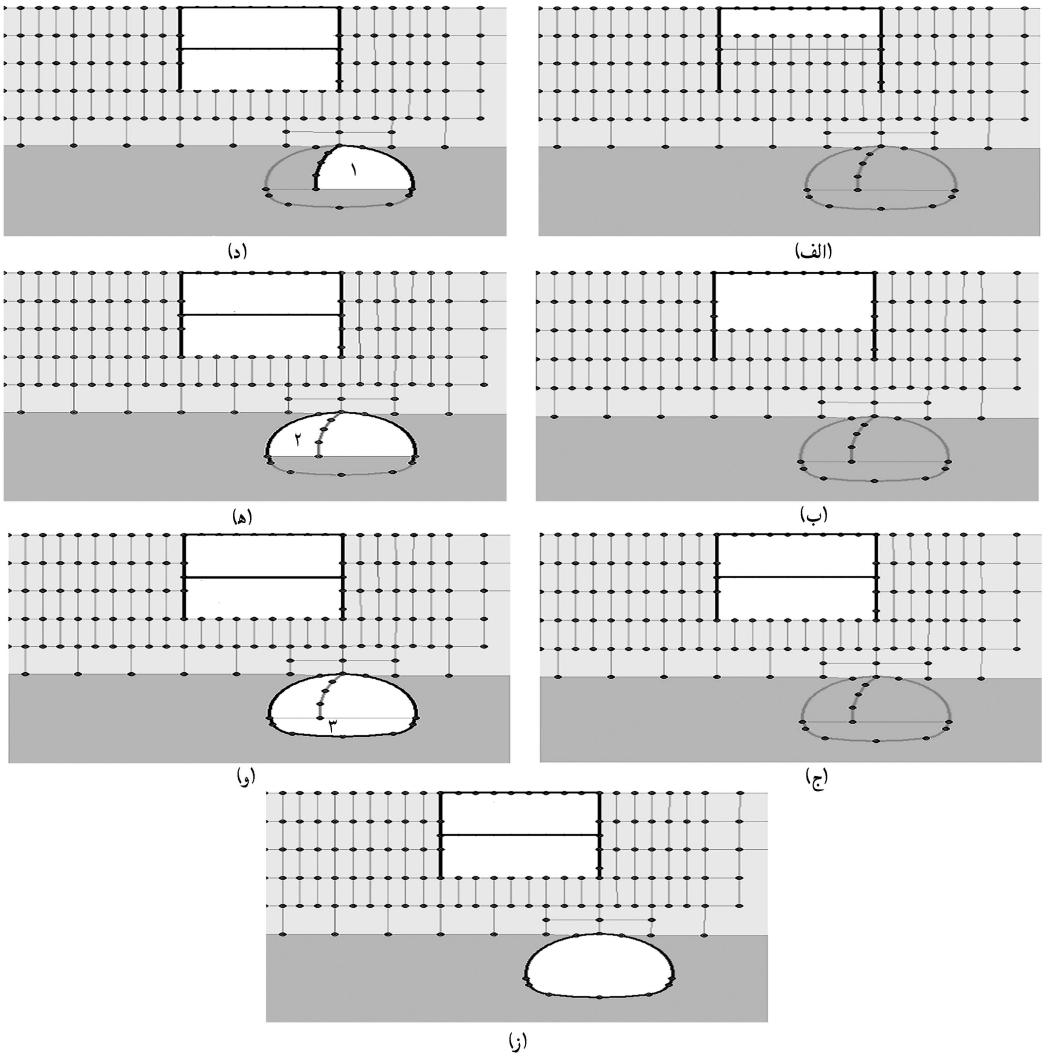
مراحل اجرایی در شکل ۳ نشان داده شده است.

تعریف پارامترهای مدل

چنان‌که پیش‌تر اشاره شد برای بررسی اثر متقابل اجرای تونل و گودبرداری، پارامترهای مختلف هندسی، آب زیرزمینی و نگه‌دارنده‌ها انتخاب و در مدل‌سازی تحلیل و حساسیت‌سنجی شده است.

پارامترهای متغیر در مدل‌های مورد بررسی عبارت‌اند از: ۱. عرض و عمق گود؛ ۲. فاصله‌ی لبه‌ی گود از تاج تونل؛ ۳. عمق روباره‌ی تونل، سطح آب زیرزمینی؛ ۴. مشخصات نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل.

کمیت‌های تأثیرپذیر که در حالات مختلف باید مورد بررسی قرار گیرند عبارت‌اند از: ۱. تغییر مکان افقی دیواره‌ی گود؛ ۲. تغییرشکل سطح زمین در بالای تاج تونل؛ ۳. نشست لبه‌ی گود؛ ۴. تغییرشکل



شکل ۳. (الف) مرحله‌ی ۱: گودبرداری به‌عمق ۳ متر و اجرای دیوار دیافراگم و مهاری‌های مربوطه در بالای دیوار؛ (ب) مرحله‌ی ۲: گودبرداری به‌عمق ۳ متر دیگر؛ (ج) مرحله‌ی ۳ و ۴: گودبرداری به‌عمق ۳ متر و اجرای مهاری وسط گود و بارگذاری کف؛ (د) مرحله‌ی ۵: حفاری بخش ۱ تونل و اجرای نگه‌دارنده‌ی اولیه در این بخش؛ (ه) مرحله‌ی ۶: حفاری بخش ۲ تونل و اجرای نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی دیواره‌ی سمت چپ تونل؛ (و) مرحله‌ی ۷: حفاری بخش ۳ تونل و اجرای نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی کف تونل؛ (ز) مرحله‌ی ۸: اجرای پوشش نهایی تونل.

نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل؛ ۵. توزیع تنش در اطراف تونل وگود؛ ۶. توزیع نقاط خمیری در اطراف تونل و گود.

تحلیل و بررسی نتایج مدل‌سازی

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که روند تغییرشکل‌های ایجاد شده در نقاط مختلف مورد بررسی در حالت‌های مختلف تقریباً یکسان بوده و فقط در مقدار جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌ها متفاوت‌اند.

۱. بررسی اثر عرض گود

با افزایش عرض گود، تغییرشکل‌های افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود، نشست سطح زمین در بالای تاج تونل و نشست لبه‌ی گود افزایش می‌یابد. روند افزایش تغییرشکل‌های افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود برای گودهای به‌عمق ۱۲ متر قابل توجه است. برای میانگین مقادیر بیشینه‌ی نشست سطح زمین در بالای تاج تونل در فواصل مختلف لبه‌ی گود از تاج تونل، تغییرات مقدار نشست با افزایش عرض گود بسیار ناچیز بوده و به یک میلی‌متر هم نمی‌رسد. نرخ افزایش نشست لبه‌ی گود برای عمق‌های مختلف گود متفاوت بوده و بین ۱۲ تا ۷۰ درصد در تغییر است. هرقدر عمق گود کم‌تر باشد، عرض گود در تغییرات نشست لبه‌ی گود مؤثرتر بوده و مقدار نشست نیز بیشتر خواهد بود.

نتایج نشان می‌دهد که برای گودهایی تا عمق ۹ متر، با افزایش عرض گود تغییرشکل نگه‌دارنده‌ی تونل افزایش می‌یابد. چنانچه عمق گود به ۱۲ متر برسد، با افزایش عرض گود تغییرشکل نگه‌دارنده‌ی تونل

کاهش خواهد یافت. در توزیع نقاط خمیری اطراف تونل و گود، عرض گود تأثیر چندانی ندارد و فقط در مواردی تغییرات عرض گود، تغییراتی در توزیع نقاط خمیری اطراف دیواره گود ایجاد می‌کند. شکل‌های ۴ تا ۶ تغییرات پارامترهای مختلف را با تغییر عرض گود نشان می‌دهند.

۲. بررسی اثر عمق گود

با افزایش عمق گود، تغییرمکان افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود افزایش می‌یابد. در شکل ۷ نمودار تغییرشکل‌های افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود نسبت به عمق گود برای عرض‌های مختلف گود مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نرخ تغییرات تا عمق ۹ متر بوده و با افزایش عمق گود از ۹ متر به ۱۲ متر مقدار تغییرشکل‌ها حدود دو تا سه برابر افزایش می‌یابد.

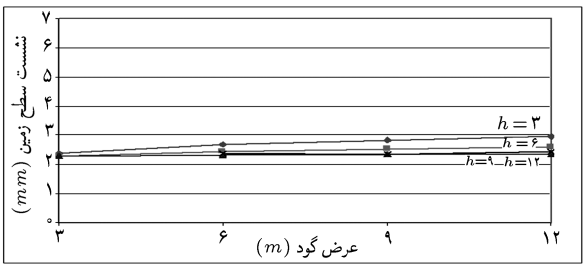
از نتایج چنین برمی‌آید که در حالتی که لبه‌ی گود در بالای تاج تونل، یا در فاصله‌ی نصف قطر تونل از تاج تونل قرار گرفته باشد، با افزایش عمق گود از ۳ متر به ۹ متر نشست سطح زمین در بالای تاج تونل کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد توجیه این موضوع با در نظرگرفتن گود به‌صورت تیری با ارتفاع و طول معین امکان‌پذیر است. با افزایش سختی خمشی تیر مذکور تغییرشکل‌های کوچک‌تری حاصل می‌شود. با افزایش بیشتر عمق گود، مقدار نشست افزایش می‌یابد. علت افزایشِ نشست، واقع شدن پای دیوار گود به‌عمق ۱۲ متر در فاصله‌ی نزدیکی در بالای تاج تونل است که نشست تاج تونل باعث افزایش نشست لبه‌ی گود شده و به‌تبع آن نشست سطح زمین در فاصله‌ی نصف قطر تونل از لبه‌ی گود افزایش می‌یابد. در حالتی که فاصله‌ی لبه‌ی گود از تاج تونل بیش از نصف قطر تونل باشد، با افزایش عمق گود از ۳ متر به ۹ متر نشست سطح زمین در بالای تاج تونل کاهش یافته و با افزایش بیشتر عمق گود مقدار نشست تقریباً ثابت می‌ماند.

تغییرات نشست لبه‌ی گود برای تمام فواصل لبه‌ی گود از تاج تونل مشابه است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق گود از ۳ متر به ۹ متر نشست لبه‌ی گود کاهش یافته و با افزایش بیشتر عمق گود، مقدار نشست افزایش می‌یابد. تغییرشکل بیشینه‌ی نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل با افزایش عمق گود کاهش می‌یابد.

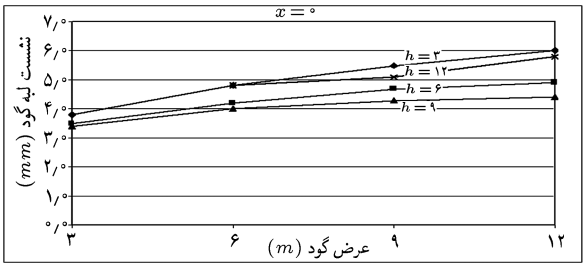
عمق گود عامل مؤثری در توزیع نقاط خمیری اطراف تونل و گود است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق گود نقاط خمیری در اطراف گود افزایش می‌یابد و در مقابل تعداد نقاط خمیری اطراف تونل کاهش خواهد یافت. شکل‌های ۸ تا ۱۱ تغییرات پارامترهای مختلف را با تغییر عمق گود نشان می‌دهند.

۳. بررسی اثر فاصله لبه گود از تاج تونل

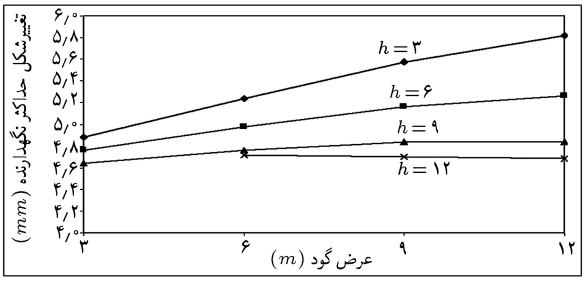
با افزایش فاصله‌ی لبه‌ی گود از تاج تونل، تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود، نشست سطح زمین در بالای تاج تونل، نشست لبه‌ی



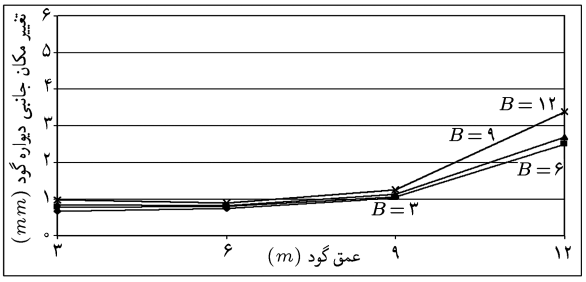
شکل ۴. تغییرات نشست سطح زمین به عرض گود برای عمق‌های مختلف گود (مقادیر میانگین برای فواصل $۰/۵D$ تا $۲D$ لبه گود از تاج تونل).



شکل ۵. نشست لبه‌ی گود نسبت به عرض گود برای عمق‌های مختلف گود (لبه گود در بالای تاج تونل).

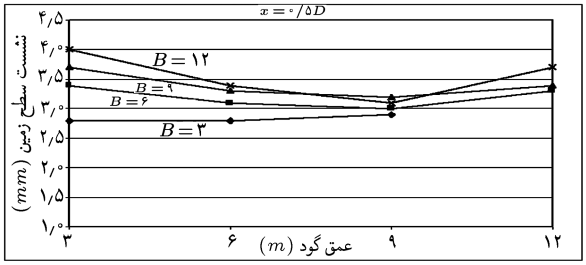


شکل ۶. تغییرشکل بیشینه‌ی نگه‌دارنده به عرض گود برای عمق‌های مختلف گود.

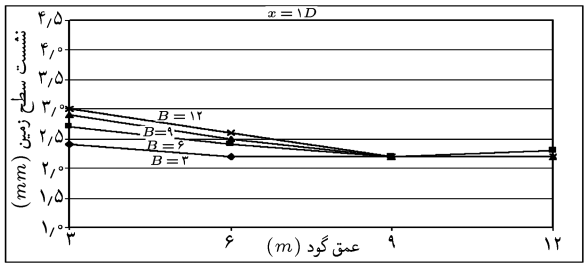


شکل ۷. تغییرشکل‌های افقی دیواره‌ی گود نسبت به عمق‌گود برای عرض‌های مختلف گود (متوسط مقادیر در فواصل $۰/۵D$ تا $۲D$).

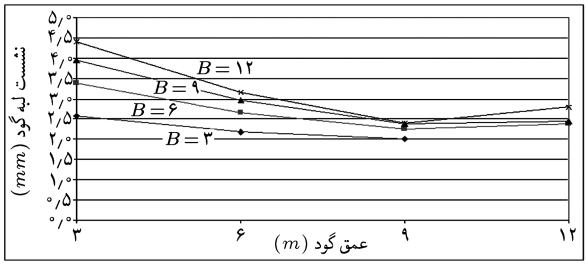
گود و تغییرشکل نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل کاهش می‌یابد. تا فاصله‌ی افقی یک قطر تونل، بین لبه‌ی گود و تاج تونل، تأثیر فاصله بر مقدار نشست سطح زمین بسیار زیاد است و همچنین اختلاف مقادیر نشست سطح زمین بین سه حالت $X=۰$ (لبه‌ی گود در بالای تاج تونل)، $X=۰/۵D$ (لبه‌ی گود در فاصله‌ی نصف قطر تونل از تاج تونل) و



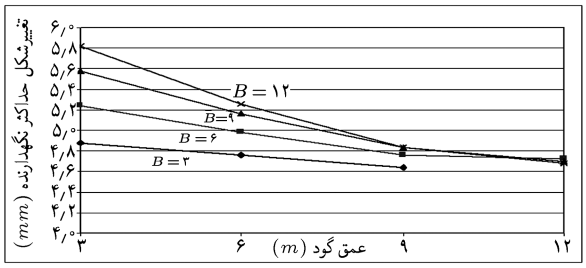
شکل ۸. تغییرات نشست سطح زمین با عمق گود (لبه‌ی گود در فاصله‌ی نصف قطر تونل از تاج تونل).



شکل ۹. تغییرات نشست سطح زمین با عمق گود (لبه‌ی گود در فاصله‌ی افقی برابر یک قطر تونل).



شکل ۱۰. تغییرات نشست لبه‌ی گود با عمق گود برای میانگین مقادیر در فواصل مختلف.



شکل ۱۱. تغییرشکل نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل نسبت به عمق گود برای میانگین مقادیر در فواصل مختلف.

$X = ۱D$ (لبه‌ی گود در فاصله‌ی یک قطر تونل از تاج تونل) بسیار قابل توجه است. اختلاف تغییرشکل‌ها بین دو حالتی که لبه‌ی گود در بالای تاج تونل یا به فاصله‌ی نصف قطر تونل از تاج تونل واقع شده است در بعضی موارد به ۸۵ درصد می‌رسد. با افزایش بیشتر فاصله اختلاف بین مقادیر کاهش یافته و منحنی مربوط به فواصل یک برابر قطر تونل ($۱D$)، یک و نیم برابر قطر تونل ($۱/۵D$) و دو برابر قطر تونل ($۲D$) بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش فاصله به‌اندازه‌ی دو برابر قطر تونل، تأثیر فاصله بر میزان نشست لبه‌ی گود از بین نمی‌رود. بیشترین تأثیر این پارامتر در گودهایی به‌عمق ۹ و ۱۲ متر است که با افزایش فاصله از نیم‌قطر به یک‌قطر اختلاف، نشست لبه‌ی گود به ۵۰ درصد می‌رسد. با افزایش فاصله‌ی تعداد نقاط خمیری و گستردگی منطقه‌ی خمیری در اطراف تونل و گود، کاهش می‌یابد. شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ تغییرات پارامترهای مختلف را براثر تغییر عمق گود نشان می‌دهند.

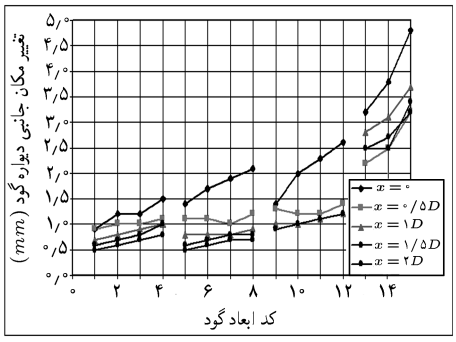
۴. بررسی اثر عمق روباره‌ی تونل

در حالتی که لبه‌ی گود در بالای تاج تونل واقع شده باشد ($x = ۰$)، با کاهش عمق روباره‌ی تونل، تغییر مکان افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود، نشست سطح زمین در بالای تاج تونل و نشست لبه‌ی گود افزایش می‌یابد. علت این است که با کاهش عمق روباره و واقع‌شدن دیواره‌ی گود در فاصله‌ی نزدیکی در بالای تاج تونل، حفاری و اجرای تونل باعث جابه‌جایی خاک اطراف گود و ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ‌تر در محیط اطراف می‌شود. در سایر حالات چنانچه لبه‌ی گود در بالای تاج تونل واقع نشده باشد، با افزایش عمق روباره‌ی تونل، مقدار تغییرشکل‌های مذکور افزایش می‌یابد. علت این موضوع جابه‌جا شدن توده‌ی عظیم‌تر خاک در اثر حفاری تونل در عمق زیاد است. تغییرشکل بیشینه‌ی نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل، با افزایش عمق روباره‌ی تونل افزایش می‌یابد که علت آن، ممکن است افزایش تنش و درنتیجه افزایش کرنش در نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل باشد که منجر به ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ‌تر آن می‌شود. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ تغییرات پارامترها در اثر تغییرات عمق روباره‌ی تونل نشان داده شده است.

۵. بررسی اثر سطح آب زیرزمینی

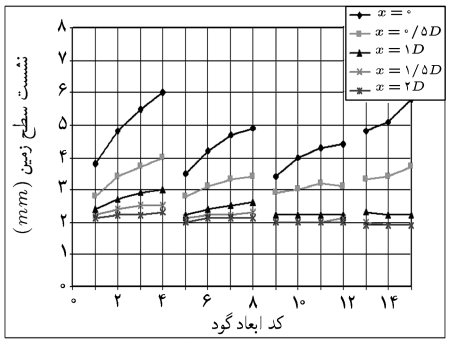
سطح آب زیرزمینی در دو حالت بررسی می‌شود: الف) سطح آب زیرزمینی در تراز تاج تونل؛ ب) سطح آب زیرزمینی در تراز کف تونل. پارامترهای مقاومتی خاک در زیر سطح آب زیرزمینی حاصل از آزمایش برش مستقیم تحکیم‌یافته، و در بالای سطح آب حاصل از آزمایش برش مستقیم سریع است. برای در نظرگرفتن رفتار بلندمدت خاک بدون نیاز به مدل‌سازی بارگذاری زهکشی نشده‌ی سریع و تحکیم خاک، رفتار خاک در بالا و زیر سطح آب زیرزمینی، زهکشی شده در نظر گرفته شده است. لازم به‌ذکر است که وزن مخصوص مرطوب خاک در زیر سطح آب زیرزمینی وزن مخصوص اشباع است. مشخصات خاک در این حالات در جدول ۴ آورده شده است.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که با بالا آمدن سطح آب زیرزمینی تغییرشکل‌های ایجاد شده در سطح زمین و در اطراف گود



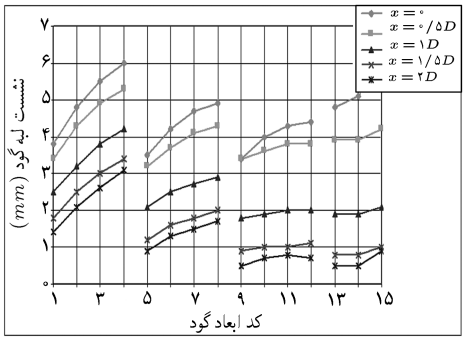
کد	عمق گود	عرض گود
۱	۳	۳
۲	۳	۶
۳	۳	۹
۴	۳	۱۲
۵	۶	۳
۶	۶	۶
۷	۶	۹
۸	۶	۱۲
۹	۹	۳
۱۰	۹	۶
۱۱	۹	۹
۱۲	۹	۱۲
۱۳	۱۲	۶
۱۴	۱۲	۹
۱۵	۱۲	۱۲

شکل ۱۲. مقایسه‌ی تغییر مکان جانبی دیواره‌ی گود برای ابعاد مختلف گود در فواصل مختلف.



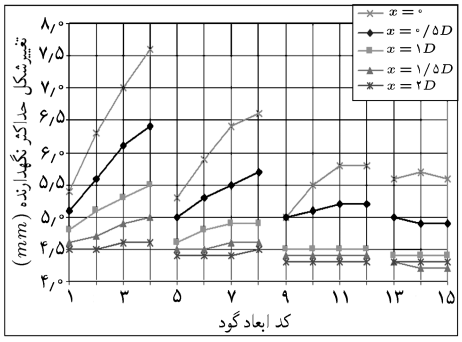
کد	عمق گود	عرض گود
۱	۳	۳
۲	۳	۶
۳	۳	۹
۴	۳	۱۲
۵	۶	۳
۶	۶	۶
۷	۶	۹
۸	۶	۱۲
۹	۹	۳
۱۰	۹	۶
۱۱	۹	۹
۱۲	۹	۱۲
۱۳	۱۲	۶
۱۴	۱۲	۹
۱۵	۱۲	۱۲

شکل ۱۳. مقایسه‌ی نشست سطح زمین در بالای تاج تونل برای ابعاد مختلف گود در فواصل مختلف.



کد	عمق گود	عرض گود
۱	۳	۳
۲	۳	۶
۳	۳	۹
۴	۳	۱۲
۵	۶	۳
۶	۶	۶
۷	۶	۹
۸	۶	۱۲
۹	۹	۳
۱۰	۹	۶
۱۱	۹	۹
۱۲	۹	۱۲
۱۳	۱۲	۶
۱۴	۱۲	۹
۱۵	۱۲	۱۲

شکل ۱۴. مقایسه‌ی نشست لبه‌ی گود برای ابعاد مختلف گود در فواصل مختلف.



کد	عمق گود	عرض گود
۱	۳	۳
۲	۳	۶
۳	۳	۹
۴	۳	۱۲
۵	۶	۳
۶	۶	۶
۷	۶	۹
۸	۶	۱۲
۹	۹	۳
۱۰	۹	۶
۱۱	۹	۹
۱۲	۹	۱۲
۱۳	۱۲	۶
۱۴	۱۲	۹
۱۵	۱۲	۱۲

شکل ۱۵. مقایسه‌ی تغییرشکل نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل برای ابعاد مختلف گود در فواصل مختلف.

و تونل افزایش می‌یابد. علت آن است که افزایش وزن کل توده خاک اشباع و درنتیجه‌ی افزایش تنش کل در خاک است. از طرف دیگر با کاهش تنش مؤثر و همچنین کاهش چسبندگی خاک، مقاومت خاک کاهش و تغییرشکل‌ها افزایش خواهد یافت.

۶. بررسی اثر سیستم نگه‌دارنده‌ی اولیه تونل

سه نوع پروفیل همراه با یک لایه شاتکریت به‌عنوان سیستم نگه‌دارنده‌ی اولیه در نظرگرفته شده است. مشخصات این سه نوع نگه‌دارنده در جدول ۵ آورده شده است.

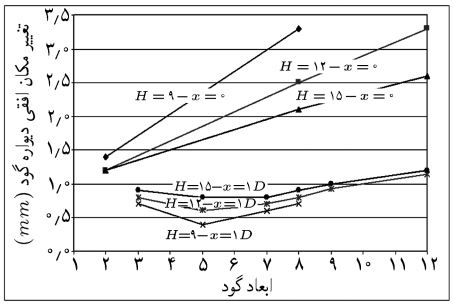
نتایج نشان می‌دهند که چنانچه لبه‌ی گود در بالای تاج تونل واقع شده باشد با افزایش سختیِ نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل، تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود کاهش می‌یابد. علت این است که با افزایش سختی نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل، جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در خاک بالای تونل کاهش یافته و به‌دلیل کاهش کرنش‌های افقی در محل دیوارگود، تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیوارکاهش می‌یابد. اما چنانچه لبه‌ی گود در فاصله‌ی افقی نصف قطر تونل از تاج تونل واقع شده باشد، نوع نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل در تغییرشکل جانبی دیواره‌ی گود تأثیری نخواهد داشت. نشست سطح زمین در بالای تاج تونل و نشست لبه‌ی گود با افزایش سختی نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل، کاهش می‌یابد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ تغییرات نشست سطح زمین در بالای تاج تونل و نشست لبه‌ی گود را نسبت به نوع نگه‌دارنده‌ی اولیه تونل نشان می‌دهد. راهنمای کنار نمودار $B5-L-D1D_2$ حالات مختلف گود را از نظر ابعاد و فاصله تا تاج تونل نشان می‌دهد. L نشان‌دهنده‌ی

جدول ۴. مشخصات خاک در بالا و پائین سطح آب زیرزمینی.

مشخصات خاک	γ_d (KN/m^3)	$\gamma total$ (KN/m^3)	C (KN/m^2)	φ (درجه)
زیرسطح آب زیرزمینی	۲۰/۷	۲۲/۹	۱۰	۴۲
بالای‌سطح آب زیرزمینی	۲۰/۷	۲۲/۱	۲۵	۴۵

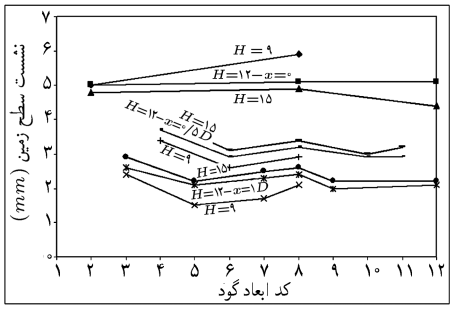
جدول ۵. مشخصات نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل.

	نوع نگهدارنده‌ی اولیه	سختی خمشی $EI(KNm^2/m)$	سختی محوری $EA(KN/m)$
۱	$IPE18$ در فواصل یک متری همراه با یک لایه شاتکریت	۲۶۴۰	۴۷۸۰۰۰
۲	$IPE18$ در فواصل نیم متری همراه با یک لایه شاتکریت	۵۲۸۰	۹۵۶۰۰۰
۳	$IPE20$ در فواصل نیم متری همراه با یک لایه شاتکریت	۷۷۶۰	۱۱۴۰۰۰



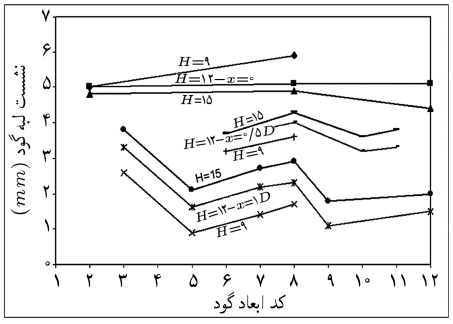
کد	عمق گود	عرض گود
۱	۳	۳
۲	۳	۶
۳	۳	۹
۴	۳	۱۲
۵	۶	۳
۶	۶	۶
۷	۶	۹
۸	۶	۱۲
۹	۹	۳
۱۰	۹	۶
۱۱	۹	۹
۱۲	۹	۱۲
۱۳	۱۲	۶
۱۴	۱۲	۹
۱۵	۱۲	۱۲

شکل ۱۶. اثر عمق روباره تونل در تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود به‌فاصله‌ی افقی صفر و یک قطر تونل.



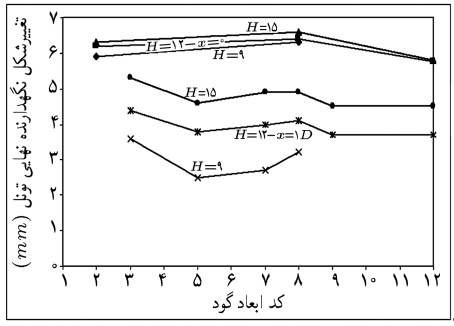
کد	عمق گود	عرض گود
۱	۳	۳
۲	۳	۶
۳	۳	۹
۴	۳	۱۲
۵	۶	۳
۶	۶	۶
۷	۶	۹
۸	۶	۱۲
۹	۹	۳
۱۰	۹	۶
۱۱	۹	۹
۱۲	۹	۱۲
۱۳	۱۲	۶
۱۴	۱۲	۹
۱۵	۱۲	۱۲

شکل ۱۷. اثر عمق روباره‌ی تونل در نشست سطح زمین در بالای تاج تونل.



کد	عمق گود	عرض گود
۱	۳	۳
۲	۳	۶
۳	۳	۹
۴	۳	۱۲
۵	۶	۳
۶	۶	۶
۷	۶	۹
۸	۶	۱۲
۹	۹	۳
۱۰	۹	۶
۱۱	۹	۹
۱۲	۹	۱۲
۱۳	۱۲	۶
۱۴	۱۲	۹
۱۵	۱۲	۱۲

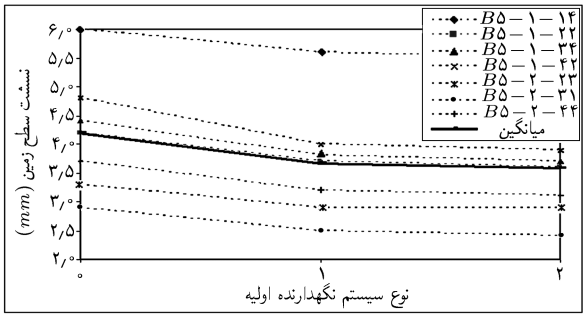
شکل ۱۸. اثر عمق روباره‌ی تونل در میزان نشست لبه‌ی گود.



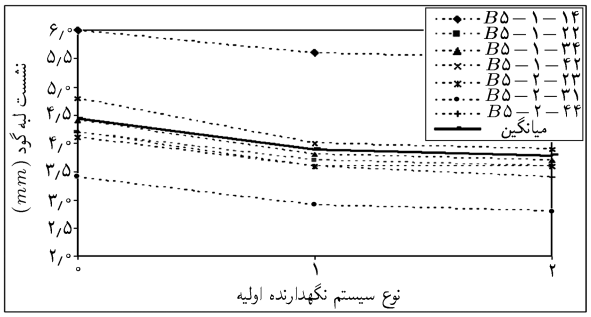
کد	عمق گود	عرض گود
۱	۳	۳
۲	۳	۶
۳	۳	۹
۴	۳	۱۲
۵	۶	۳
۶	۶	۶
۷	۶	۹
۸	۶	۱۲
۹	۹	۳
۱۰	۹	۶
۱۱	۹	۹
۱۲	۹	۱۲
۱۳	۱۲	۶
۱۴	۱۲	۹
۱۵	۱۲	۱۲

شکل ۱۹. اثر عمق روباره‌ی تونل در تغییرشکل نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل.

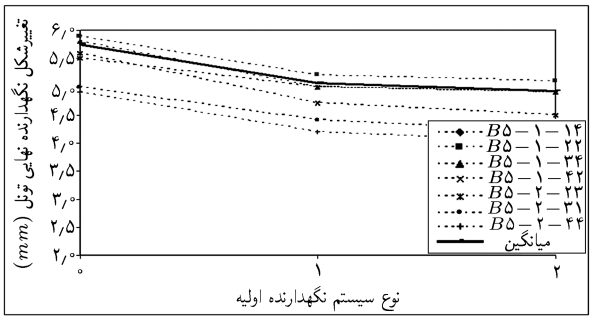
فاصله‌ی لبه گود از تاج تونل و D_1 و D_2 به‌ترتیب معرف عمق و عرض گود هستند. خطی که با ضخامت بیشتر ترسیم شده، میانگین مقادیر نشست بیشینه برای ابعاد مختلف گود و فواصل مختلف لبه‌ی گود از تاج تونل است. مقادیر متغیر این پارامترها و کد هر پارامتر که در



شکل ۲۰. اثر نوع نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل درنشست سطح زمین در بالای تاج تونل.



شکل ۲۱. اثر نوع نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل در میزان نشست لبه‌ی گود.



شکل ۲۲. اثر نوع نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل در تغییرشکل نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل.

شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ نمایان هستند، در جدول ۶ ارائه شده است.

شکل ۲۲ مقادیر تغییرشکل بیشینه‌ی نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل را نسبت به نوع نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل در حالات مختلف از نظر ابعاد گود و فاصله‌ی افقی لبه‌ی گود از تاج تونل نشان می‌دهد. خطی که با ضخامت بیشتر ترسیم شده است نشان‌گر میانگین مقادیر تغییرشکل بیشینه‌ی نگه دارنده‌ی نهایی تونل برای ابعاد مختلف گود و فواصل مختلف لبه‌ی گود از تاج تونل است. ملاحظه می‌شود که با افزایش سختی نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل، تغییرشکل بیشینه‌ی نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل کاهش می‌یابد. علت این است که با افزایش سختی نگه‌دارنده‌ی اولیه‌ی تونل، تغییرشکل‌های اولیه‌ی کم‌تری در آن ایجاد شده که در نهایت باعث کاهش تغییرشکل‌های نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل نیز می‌شود.

جدول ۶. پارامترهای مورد استفاده‌ی گود در تحلیل نتایج.

$L(m)$	۱	۲	۳	۴	۵
فاصله لبه گود تا تاج تونل	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰
$D۱(m)$	۱	۲	۳	۴	
عمق گود	۳	۶	۹	۱۲	
$D۲(m)$	۱	۲	۳	۴	
عرض گود	۳	۶	۹	۱۲	

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های انجام شده عبارت‌اند از:

۱. در روش پیشنهادی برای حفاری تونل، پروفیل‌های فلزی به‌کار رفته به‌عنوان سیستم نگه‌دارنده‌ی اولیه و پوشش بتنی به‌عنوان نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل مناسب عمل کرده، و تغییرشکل‌های کمی در محیط ایجاد می‌کند.

۲. پوشش کف تونل برای ایجاد صلبیت کافی و واقعی‌تر کردن مدل ضروری است. در غیر این صورت کف تونل دچار تغییرشکل‌های بزرگی می‌شد که غیرواقعی‌اند.

۳. دیوار دیافراگم و پشت‌بندهای افقی استفاده شده در گود ساختمانی به‌منظور کاهش تغییرشکل‌ها در محل گود، در مراحل گودبرداری و اعمال بار ناشی از ساختمان مؤثر بوده و مناسب عمل کرده است.

۴. بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی دیواره‌ی گود حاصل از تحلیل کلیه‌ی مدل‌های ساخته شده و با تغییر همه‌ی پارامترهای مؤثر، ۴٫۸ میلی‌متر برای گود به‌عمق ۱۲ متر به‌دست آمده است که اگر تغییر مکان جانبی مجاز را برابر یک درصد عمق گود در نظر بگیریم، این نسبت خیلی کم‌تر از مقدار مجاز بوده و مشکلی از این لحاظ وجود ندارد.

۵. حداکثر فرونشست سطح زمین، در حالتی که لبه‌ی گود در بالای تاج تونل واقع شده است برابر ۶ میلی‌متر به‌دست آمده است. در سایر حالات فرونشست سطح زمین کم‌تر از ۵ میلی‌متر است.

۶. تغییرشکل بیشینه‌ی نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل ۷٫۶ میلی‌متر است. این مقدار برای حالتی که گود به عمق ۳ متر و عرض ۱۲ متر در بالای تاج تونل قرار گرفته، به دست آمده است. به‌طور کلی چنانچه لبه‌ی گود در بالای تاج تونل واقع شود نگه‌دارنده‌ی نهایی تونل بیشترین تغییرشکل را خواهد داشت.

۷. رابطه‌ی بین نشست بیشینه‌ی سطح زمین و نشست تاج تونل به‌عمق روباره‌ی ۱۵ متر به‌صورت خطی است که در دو حالت $X = ۰$ (لبه‌ی گود در بالای تاج تونل) و $X = ۰٫۵D$ (لبه‌ی گود در فاصله‌ی نصف قطر تونل از تاج تونل) مقادیر نسبت فرونشست سطح زمین به نشست تاج تونل (Ss/Sc) برای ابعاد مختلف گود متفاوت است. با افزایش فاصله‌ی لبه‌ی گود از تاج تونل مقدار این نسبت کاملاً به نوع خاک وابسته بوده و برابر مقدار ثابت ۰٫۵ است.

۲. گزارش مطالعات زمین‌شناسی و هیدروگرافی شهر تهران، شرکت مترو شهری تهران و حومه.

۳. نتایج مطالعات ژئوتکنیک و زمین‌شناسی بخش‌های شمالی خط ۱ متروی تهران، شرکت مترو شهری تهران و حومه.

منابع

1. Luis Eduardo Sozio. “General report: Urban constraints on underground works”, Tunnels and Metropolises, Negro Jr. & Ferreira Eds. Balkema, Rotterdam (1998).