

تحلیل پایداری ایستگاه میدان قدس خط ۱ متروی تهران با توجه به روش حفاری در نظر گرفته شده با نرم افزار PLAXIS

رضا کردستانی^{۱*}، کوروش شهریار^۲، پرویز معارف وند^۳

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار دانشکده مهندسی مه دن و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۲۲ اردیبهشت ۹۱، پذیرش اردیبهشت ۹۲)

چکیده

بررسی وضعیت پایداری و حل مشکلات احتمالی یک سازه، پیش از آغاز ساخت آن به طراح و مجری طرح، این امکان را می‌دهد که بتواند بررسی فنی و اقتصادی صحیحی از شرایط ساخت و پایداری دائمی سازه انجام دهند. یک مهندس طراح و مجری حفاری و نگهداری تونل مترو نیز می‌تواند با استفاده از تحلیل پایداری تونل مترو نتایج مهمی در مورد پایداری تونل و تجهیزات لازم برای نگهداری آن در هنگام ساخت و بهره‌برداری بدست آورد. ایستگاه X1 میدان قدس در مسیر توسعه شمالی خط ۱ متروی تهران در محدوده میدان قدس و خیابان دربند است که از امتداد خط ۱ در شمال ایستگاه X1، شروع و تا انتهای مسیر و پارکینگ قطارها در زیر خیابان دربند به پایان می‌رسد. از جمله عوامل موثر در پایداری این ایستگاه، وضعیت زمین‌شناسی، ویژگی‌های ژئومکانیکی خاک، وضعیت آب‌های زیرزمینی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح بکار رفته، بارهای ترافیکی، جابجایی دیواره‌های تونل و تعیین مقدار نشست سطح زمین است. با در نظر گرفتن مقدار و میزان تأثیرگذاری این عوامل و به‌کارگیری آن‌ها با روش تحلیل عددی المان محدود پایداری ایستگاه مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS در ۱۰ حالت ممکن برای این ایستگاه مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر بارهای ترافیکی، تغییرات رو باره و آب زیرزمینی بر مقدار جابجایی و نشست، نیروهای برشی و محوری، تنش و گشتاور خمشی مشخص شود. این بررسی در نهایت به نتیجه‌گیری در مورد پایدار بودن ایستگاه با حداکثر جابجایی ۲۶ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر نشست در سطح انجامید.

کلمات کلیدی

خط ۱ متروی تهران، ایستگاه X1 میدان قدس، تحلیل پایداری تونل، نرم‌افزار PLAXIS، روش المان محدود

* نویسنده مسئول مکاتبات: ntmexp@hotmail.com

۱- مقدمه

سابقه بحث و گفتگو درباره احداث قطار شهری در تهران مربوط به تأسیس تراموای شهری بود که بارون ژولیوس دو روی تر فرانسوی در عهد ناصرالدین شاه روی کاغذ آورد. اما مطالعه اصولی برای احداث متروی زیرزمینی در تهران از سال ۱۳۴۹ شروع شد. در حال حاضر افزایش جمعیت در کلان‌شهر تهران وجود یک سیستم حمل‌ونقل عمومی با توان مناسب برای جابجایی شهروندان را ضروری ساخته است [۱].

در طی این سال‌ها پروژه مترو در چند خط در حال اجرا بوده است و بخش‌هایی از آن به بهره‌برداری رسیده است که خط ۱ مترو تهران با تکمیل بیش از ۸۰٪ از مسیر آن، یکی از این خطوط بوده و انتظار می‌رود تا سال ۱۳۹۴ تمامی طول این خط از میدان قدس تا فرودگاه امام خمینی (ره) مورد استفاده قرار گیرد. در صورت تکمیل خط ۱ مترو تهران، امکان جابجایی روزانه ۵۰۰ هزار مسافر وجود خواهد داشت [۱].

ایستگاه X1 میدان قدس در مسیر توسعه شمالی خط ۱ متروی تهران در محدوده میدان قدس و خیابان دربند است که از امتداد خط ۱ از شمال ایستگاه X1، شروع و تا انتهای مسیر و پارکینگ قطارها در زیر خیابان دربند به پایان می‌رسد. محل قرارگیری این ایستگاه در مسیر شمالی خط ۱ مترو در شکل (۱) نشان داده شده است [۲].

آگاهی از وضعیت پایداری و حل مشکلات احتمالی یک سازه، پیش از آغاز ساخت آن به طراح و مجری طرح، این امکان را می‌دهد که بتواند بررسی فنی و اقتصادی صحیحی از شرایط ساخت و پایداری دائمی سازه انجام دهند. یک مهندس طراح و مجری حفاری و نگهداری ایستگاه مترو نیز می‌تواند با استفاده از تحلیل پایداری ایستگاه مترو نتایج مهمی در مورد پایداری ایستگاه و تجهیزات لازم برای نگهداری آن در هنگام ساخت و بهره‌برداری بدست آورد.

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

لیبونن، مانینن و نی‌نی در سال ۲۰۰۵ تأثیر آب و وضعیت زمین‌شناسی لایه‌های خاک بر پایداری تونل را بررسی کردند [۳]. در سال ۲۰۱۲ توسط قربانی و شریف‌زاده تأثیر ویژگی‌های ژئومکانیکی [۴] و در سال ۲۰۰۹ تأثیر شرایط آب زیرزمینی در

تونل‌ها توسط کوک و جن یس [۵] بررسی شد. واکر نیز در کتاب خود به اهمیت تأثیر بار ترافیکی اشاره کرد [۶]. همچنین صادقیانی و دادی زاده به اهمیت انتخاب روش ساخت و مراحل انجام در پایداری ایستگاه در هنگام ساخت و بهره‌برداری [۷] پی بردند. در مقاله چپ من و سونگ مقدار جابجایی در سطح زمین [۸] و در مقاله شوکای و مینگ-بین تأثیر تنش‌های موثر در خاک اطراف ایستگاه و تنش‌های برشی در دیواره ایستگاه [۹] و در مقاله آکاک تأثیر گشتاور خمشی بر نشست در سطح زمین [۱۰] اندازه‌گیری شد. تعیین مقدار تأثیر هر یک از پارامترها به نتیجه‌گیری در پایداری ایستگاه X1 می‌انجامد [۱۱].

با توجه به اهمیت این مطالب، تحلیل پایداری این ایستگاه به روش عددی المان محدود با کمک نرم‌افزار PLAXIS برای بررسی میزان تأثیر آب و بارهای ترافیکی و همچنین تغییرات روباره بر روی ایستگاه مورد نظر انجام شد تا پایداری این ایستگاه با توجه به روش حفاری و سیستم نگهداری بکار رفته بررسی شده و پیشنهادهایی جهت بررسی‌ها بعدی ارائه شود. در این مقاله، منظور از بار ترافیکی، مقدار بار مضاعفی است که بر اثر حرکت وسایل نقلیه از سطح زمین بر ایستگاه وارد می‌شود. این بار در مدل برابر ۰/۶ متر عمق تونل یا ۲/۵ تن بر مترمربع در مدل اعمال می‌شود [۱۲].

۳- مشخصات هندسی ایستگاه

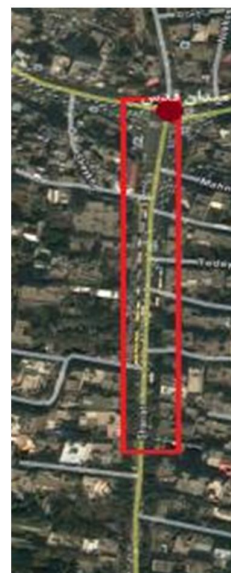
بر اساس نقشه‌های معماری، طول ایستگاه در حدود ۲۷۰ متر بوده و عرض مفید آن ۱۷/۵ متر است. ارتفاع متوسط ایستگاه از بالاترین نقطه در سقف تا پایین‌ترین نقطه در کف ۱۹/۸ متر است و کف ایستگاه در انتهای جنوبی آن در عمق ۴۲ متری از سطح زمین واقع شده است. در این مقطع، فاصله از تراز سقف ایستگاه تا سطح خیابان ۲۲/۲ متر است. عمق ایستگاه با حرکت به سمت شمال و خیابان دربند به دلیل شیب زمین بیشتر شده و در بالاترین قسمت ایستگاه، با ۳ متر افزایش روباره، سقف ایستگاه ۲۵/۲ متر زیر خیابان قرار می‌گیرد. بنابراین این ایستگاه از نظر رده‌بندی عمق ایستگاه‌ها، از نوع ایستگاه‌های زیرزمینی با عمق متوسط است. در ایستگاه X1 ریل به طور میانگین در عمق حدود ۳۹ متری زیر سطح خیابان قرار گرفته است.

طبقه‌بندی خاک بر اساس سیستم متحد، تعیین حدود اتر برگ) تعیین شد [۲]. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در محدوده ایستگاه X1 در جدول (۱) ارائه شده است [۲].

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک [۲]

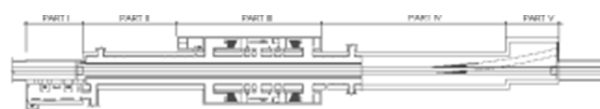
ردیف	مشخصات	نشانه	واحد	مقدار
۱	درصد رطوبت طبیعی	(w)	%	۹/۶-۷
۲	وزن مخصوص اشباع	(γ) _{Sat}	kN/m ³	۱۹/۷
۳	وزن مخصوص خشک	(γ) _d	kN/m ³	۱۲/۶
۴	وزن مخصوص	(γ) _m	kN/m ³	۲۱/۶-۲۱
۵	چگالی دانه‌های جامد	(G _s)		۲/۶۷
۶	مدول ارتجاعی	(E)	kN/m ²	E=113750 D≤۱۵ E=250250 D≥۱۵
۷	درجه اشباع	(S)	%	۷۵-۵۵
۸	تعداد ضربات در آزمایش S.P.T.	(N ₇₀)		۵۵
۹	حد روانی	(LL)	%	۳۰
۱۰	حد خمیری	(PL)	%	۲۰
۱۱	نسبت پواسون	(μ)		۰/۳۵
۱۲	زاویه اصطکاک داخلی	(ϕ)	درجه	۴۰
۱۳	چسبندگی	(C ₀)	kN/m ²	۷
۱۴	ضریب فشار در حال سکون	(K ₀)		۰/۲۲
۱۵	ضریب اصطکاک بین بتن-خاک و فولاد-خاک	(δ)		بتن-خاک: ۰/۴۵ فولاد-خاک: ۰/۲

همان‌طور که در مشخصات ژئومکانیکی لایه‌های خاک در جدول (۱) مشاهده شد، مدول الاستیسیته خاک در عمق ۱۵ متری تغییر محسوسی داشته ولی پارامترهای دیگر تغییر بسیار کم و ناچیزی داشته‌اند. بنابراین در مدل، ۲ لایه خاک مجزا با الاستیسیته متفاوت و با سایر پارامترهای یکسان، تعریف می‌شود.

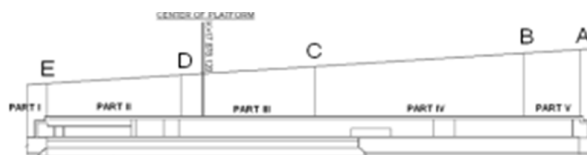


شکل ۱: مسیر شمالی خط ۱ و محل قرارگیری ایستگاه X1 [۲]

به منظور تسریع در اجرای عملیات ساخت ایستگاه، طول ۲۷۰ متری آن به پنج قطعه تقسیم شد و اجرای هر قطعه مستقل از سایر قطعات در نظر گرفته شده است. به همین منظور، بارگذاری و تحلیل پایداری این تحلیل در این ۵ مقطع انجام می‌شود. پلان و مقطع طولی ایستگاه و مقاطعی که در آن‌ها تحلیل انجام می‌شود در شکل‌های (۲) و (۳) قابل مشاهده هستند.



شکل ۲: پلان و منطقه بندی ایستگاه X1



شکل ۳: مقطع طولی و محل‌های حفاری ایستگاه

۴- مشخصات هندسی ایستگاه

با هدف شناخت وضعیت لایه‌های خاک در طول مسیر مورد نظر، ۸ حلقه گمانه در محدوده مورد بحث حفر و در آن‌ها در فواصل معین نمونه‌گیری انجام شد [۲]. طی مطالعات انجام‌شده، وضعیت لایه‌ها و مشخصات ژئوتکنیکی خاک با انجام آزمایش‌های برجا (شامل آزمایش S.P.T.) و آزمایشگاهی (شامل تعیین درصد رطوبت، دانه‌بندی،

۵- وضعیت ژئومکانیکی ساختگاه

بر اساس نتایج آزمایش‌ها، جنس غالب خاک محدوده ایستگاه X1 از نوع شن رس و لای دار، شن بد دانه‌بندی شده و رس لای دار که به اختصار (GP-GC)، (GC-GM) و (GP-GM) نامیده می‌شود بوده که در اعماق مختلف از تراکم بسیار زیادی برخوردار هستند.

به علت وجود آب‌های نفوذی رطوبت خاک در گمانه‌های شناسایی، زیاد و نزدیک حد اشباع است. محدوده ایستگاه X1 از جنس رسوبات آبرفتی ناهمگن شمال تهران (Bn) و رسوبات مخروط افکنه جوان (C) است. فراوان‌ترین کانی‌های توف در این منطقه در درجه اول کوارتز و بعد فلدسپات هستند [۲].

۶- بررسی وضعیت آب‌های زیرسطحی

بر اساس مطالعات ژئومکانیکی، آب زیرزمینی در ابتدای بالای ایستگاه (میدان قدس) در عمق ۳۳ متر از سطح زمین قرار دارد و در انتهای پایینی ایستگاه (خیابان پروین) به عمق ۴۷ متر از سطح می‌رسد. موقعیت ساخت گاه پروژه خصوصاً در محدوده میدان قدس به گونه‌ای است که پتانسیل زیادی برای جذب آب‌های زیرزمینی بر روی مخروط افکنه ساخت گاه فراهم می‌آورد. بدین ترتیب ساخت گاه دائماً از سمت شمال تغذیه می‌شود و با تخلیه از سمت جنوب آب در سطوح مورد اشاره باقی می‌ماند [۱۱].

۷- روش ساخت

تصمیم‌گیری در مورد روش ساخت، تابعی از شکل و عمق ایستگاه، وضعیت شهری، روش اجرا (شیوه عبور ترافیک، عرض معبر، ساختمان‌های موجود و تأسیسات شهری) و نیز وضعیت خاک و آب‌های زیرزمینی و سطحی، و بالاخره زمان‌بندی و برآورد مالی پروژه است. با توجه به اینکه روش‌های اجرای تونلی، در مورد ایستگاه‌های با عمق متوسط به لحاظ ایمنی و عملکرد خاک مناسب هستند، روش اجرای در نظر گرفته شده برای ایستگاه روش شاخ بزی یا CD-NATM انتخاب شد.

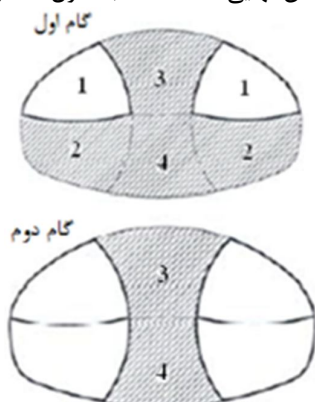
در این روش، احداث هر قطعه از تونل به صورت حفاری مرحله به مرحله با اجرای جدار موقت و در نهایت اجرای پوشش نهایی صورت می‌پذیرد. در این روش ابتدا مقطع مورد نظر حفاری تونل به قسمت‌های کوچک‌تر تقسیم شده و سپس با استفاده از ماشین‌های حفاری، هر قسمت حفاری می‌شود.

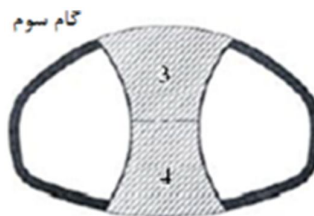
مراحل حفاری و نصب پوشش موقت و نهایی تونل بر اساس انجام چندین تحلیل اولیه و مدل‌سازی روش‌های مختلف اجرایی، تعیین می‌شود. در شکل (۴) مراحل اجرای تونل به روش شاخ بزی نشان داده شده است [۱۱].

در این ایستگاه سازه موقت از مجموعه لیس‌هایی با فاصله ۲ متر از یکدیگر تشکیل شده که توسط یک سری از قطعات افقی از جنس بتن شاتکریت شده به هم متصل شده است. همچنین سازه اصلی در ایستگاه X1، از جنس بتن شاتکریت شده است.

مراحل اجرای روش شاخ بزی به صورت زیر است [۱۱]:

- (۱) خاک‌برداری قطعه (۱) (با مقدار پیشروی ۱/۲۵ متر)
- (۲) اجرای جدار موقت بخش فوقانی با استفاده از المان‌های فلزی شامل رینگ و شبکه فولادی و شاتکریت به ضخامت مشخص بسته به ابعاد مقطع
- (۳) پیشروی در قطعه (۱)
- (۴) خاک‌برداری قطعه (۲) (به عمق پیشروی ۱/۲۵ متر)
- (۵) اجرای جدار موقت بخش فوقانی
- (۶) پیشروی در قطعه (۲) (به عمق پیشروی ۷ متر)
- (۷) حذف جدار موقت بین قطعات (۱) و (۲)
- (۸) اجرای پوشش نهایی بخش‌های حفاری شده (به طول ۶ متر)
- (۹) خاک‌برداری قطعه (۳) (به عمق پیشروی ۱/۲۵ متر)
- (۱۰) اجرای جدار موقت قطعه (۳)
- (۱۱) پیشروی در قطعه (۳) (به عمق پیشروی ۷ متر)
- (۱۲) حذف جدار موقت بین قطعات (۱) و (۳)
- (۱۳) اجرای پوشش بخش نهایی قطعه (۳) (به طول ۶ متر)
- (۱۴) خاک‌برداری قطعه (۴) و حذف جدار موقت بین قطعات (۲) و (۴) (به طول ۱/۲۵ متر)
- (۱۵) اجرای جدار موقت قطعه (۴)
- (۱۶) پیشروی در قطعه (۴) (به عمق پیشروی ۷ متر)
- (۱۷) اجرای پوشش نهایی قطعه (۴) (به طول ۶ متر)





شکل ۴: مراحل اجرا به روش شاخ بزی [۱۱]

پایداراست رسید. به این معنا که خطا در داده‌های اولیه و در حین حل آن قدر نباشد که به نتایج نامفهوم منتهی شود. روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد، که روش اجزاء محدود یکی از بهترین آن‌هاست. این روش در حل معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه‌های پیچیده (مانند وسایل نقلیه و لوله‌های انتقال نفت)، یا هنگامی که دامنه متغیر است، یا وقتی که دقت بالا در همه جای دامنه الزامی نیست و یا اگر نتایج همبستگی و یکنواختی کافی را ندارند، بسیار مفید است.

۱۰- نرم‌افزار PLAXIS

PLAXIS یک نرم‌افزار المان محدود است که در خصوص آنالیز تغییر شکل پایداری پروژه‌های ژئوتکنیکی و مسائل مربوط به خاک و سنگ تدوین شده است [۱۲].

مدل‌سازی رفتار خاک، خود، مسئله پیچیده‌ای است و نیز در بیشتر پروژه‌های ژئوتکنیکی بایستی عناصر سازه‌ای و محل تماس سازه با خاک نیز مدل‌سازی شود. نرم‌افزار PLAXIS برای مدل‌سازی این رفتار مختلط توانایی بالایی دارد [۱۲].

کاربردهای ژئوتکنیکی، نیازمند مدل‌های پیوسته پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار غیر ایزوتروپیک و غیرخطی وابسته به زمان خاک و یا سنگ است. مهندسانی که کارهای اجرایی انجام می‌دهند اغلب تمایل دارند که در پروژه‌های خود از آنالیز غیرخطی المان محدود که مسئله زمان را نیز در بر می‌گیرد استفاده کنند. تیم تحقیقاتی PLAXIS سعی در برآورده کردن این نیاز جامعه مهندسی دارد [۱۲].

این برنامه از امکانات گرافیکی ساده‌ای استفاده می‌کند تا کاربر را برای ایجاد مدل ژئوتکنیکی و مش بندی المان محدود که بر مبنای مقاطع عرضی عمودی که معرف وضعیت موجود است قادر سازد [۱۲].

تدوین نرم‌افزار PLAXIS از سال ۱۹۸۷ در دانشگاه صنعتی دلفت (Delft) در هلند شروع شد. هدف اولیه این برنامه استفاده از کدهای المان محدود برای تحلیل خاک ریز بر روی رودخانه‌ای با بستر خاک نرم بود. اما چندی نگذشت که بازه توانایی‌های این برنامه، اغلب مسائل ژئوتکنیکی را تحت پوشش قرار داد و به علت رشد این برنامه در سال ۱۹۹۳ شرکتی به نام Plaxis bv تأسیس شد [۱۳].

۱۱- بررسی صحت نرم‌افزار PLAXIS

به منظور بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار و مدل‌های مورد مطالعه، نتایج یک تحقیق انجام‌شده با این نرم‌افزار با مقادیر

مزایای این روش عبارت‌اند از [۱۱]:

- ۱- عدم تداخل عملیات حفاری با ترافیک سطح خیابان.
- ۲- عدم نیاز به هرگونه تجهیزات پیشرفته.
- ۳- آشنایی عمده پیمانکاران با این روش.

در این روش عملیات اجرایی شامل موارد زیر است [۱۱]:

- ۱- احداث چاه و تونل دسترسی به سازه اصلی ایستگاه: با توجه به موقعیت و عمق قرارگیری ایستگاه، قاعدتاً امکان دسترسی از طریق رمپ به تونل اصلی امکان‌پذیر نبوده و بایستی ارتباط از طریق چاه و تونل دسترسی مربوط به آن محقق گردد. چاه قائم قطری حدود ۱۵ متر و تونل دسترسی نیز قطری حدود ۵ متر دارد.

- ۲- احداث مسیرهای زهکشی موقت حین اجرا

- ۳- تأمین سیستم تهویه ایستگاه

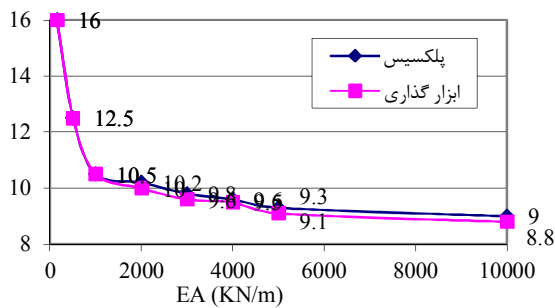
- ۴- انجام عملیات ساختمانی شامل عملیات خاک‌برداری در مراحل تعیین‌شده، اجرای جدار موقت سازه اصلی ایستگاه، اجرای لایه آب‌بند و اجرای جدار نهایی سازه اصلی ایستگاه

۸- تحلیل عددی مقاطع

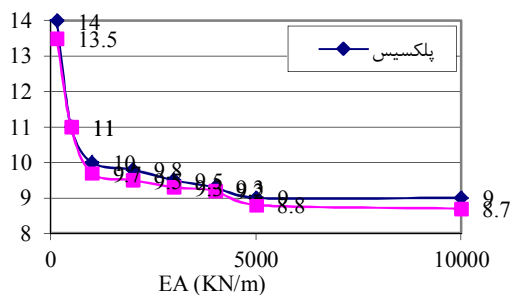
به طور کلی حفاری ایستگاه یک فرآیند سه بعدی است و با وجود امکان انجام تحلیل سه بعدی، به دلیل صرفه‌جویی در وقت و هزینه محاسبات رایانه‌ای همچنان استفاده از روش مدل‌سازی دو بعدی مرسوم بوده و از جمله روش‌های ارزنده حتی برای آنالیزهای حساس به شمار می‌رود.

۹- روش المان محدود

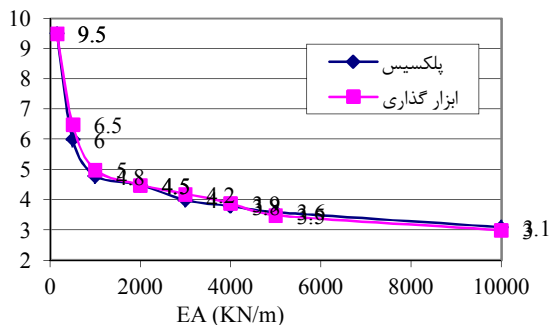
روش اجزاء محدود یا روش المان محدود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی است. کاربرد عملی اجزای محدود معمولاً با نام آنالیز اجزای محدود خوانده می‌شود. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی است که با روش‌های عددی مثل اوی‌لر حل می‌شوند. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی، مسئله مهم این است که بتوان به معادله ساده‌ای که از نظر عددی



شکل ۷: مقایسه تغییر مکان‌های کل [۱۴]



شکل ۸: مقایسه تغییر مکان‌های قائم [۱۴]



شکل ۹: مقایسه تغییر مکان‌های افقی [۱۴]

۱۲- موارد مورد بررسی در تحلیل

همان طور که گفته شد، هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر وضعیت زمین‌شناسی، پارامترهای ژئومکانیکی، بارهای ترافیکی، تغییر سطح آب زیرزمینی و تغییر خاک روباره است. با توجه به این موضوع تحلیل نتایج بدست آمده پس از اتمام مراحل ساخت در ۱۰ حالت بررسی می‌شود. این ۱۰ حالت تحلیل در جدول (۳) ذکر شده‌اند [۱۱].

با توجه به اینکه مدت زمان لازم برای حفاری تونل به نسبت زمان بهره‌برداری آن، اندک است و هدف از احداث تونل، پایداری آن در زمان بهره‌برداری است، هدف از تحلیل پایداری نهایی تونل، پس از مرحله ساخت آن و نه در طی روند حفاری است. بنابراین فقط برای آشنایی با شرایط اولیه و چگونگی مدل‌سازی

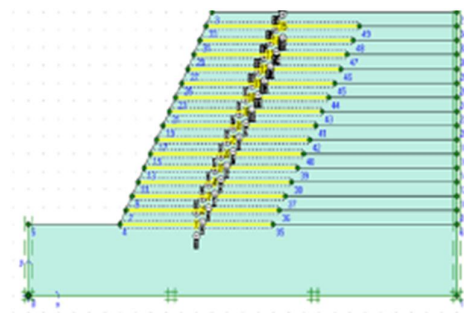
اندازه‌گیری شده مقایسه شد.

این تحقیق تأثیر مسلح کننده ژئوتکستایل در رفتار خاک ریز احداث شده روی بستر سست در بزرگراه شهید کلانتری ارومیه-تبریز را بررسی می‌کند که در آن خاک ریز متشکل از خاک دانه‌ای و مسلح به لایه‌های ژئوتکستایل مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل‌سازی این خاکریز از مدل سخت شونده^۲ استفاده شده است و پارامترهای بکار رفته در مدل‌سازی در جدول (۲) آورده شده‌اند [۱۴].

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده [۱۴]

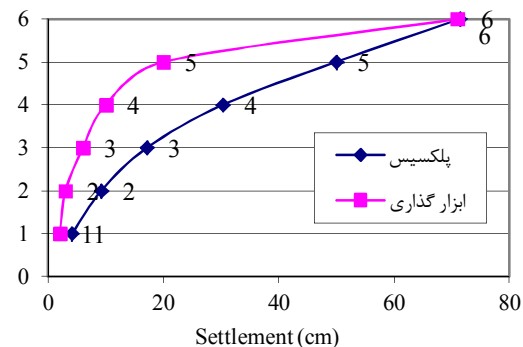
Stiffness		Strength	
E_{ref}^{50}	$3.200E+04$ kN/m ²	c_{ref}	10.000 kN/m ²
E_{ref}^{oed}	$5.177E+04$ kN/m ²	ϕ (phi)	37.000 °
power (m)	0.500	ψ (psi)	0.000 °

مقطع خاکریز در شکل شماره (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: مقطع خاکریز مورد بررسی [۱۴]

پس از مدل‌سازی و آنالیز این خاکریز توسط نرم‌افزار پلکسیس نتایج حاصل و نتایج ابزار گزاری، نشان داده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

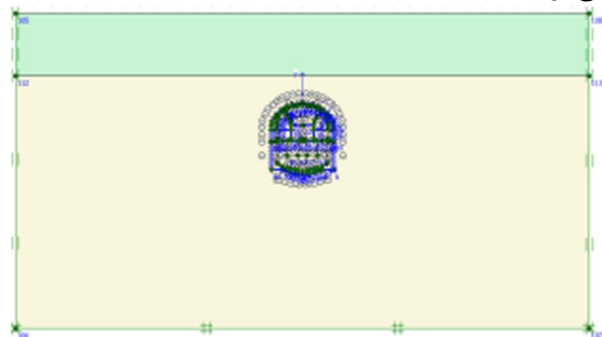


شکل ۶: مقایسه تغییر مکان‌های کل [۱۴]

مراحل حفاری، تنها، حفاری مقطع A با در نظر گرفتن شرایط آب زیرزمینی و روباره و بارهای ترافیکی به صورت گام به گام، رسم و بررسی می‌شود [۱۱].

جدول ۳: موارد تحلیلی در ۵ مقطع متفاوت ایستگاه [۱۱]

شماره تحلیل	موارد مقطع تحلیلی	تغییر روبارد (متر)	سطح آب زیرزمینی (متر)	با فرض بارهای ترافیکی (متر)	بدون فرض بارهای ترافیکی (متر)
۱	A	۳	۳۰	۰/۶	-
۲	A	۳	۳۰	-	۰
۳	B	۲	۳۴	۰/۶	-
۴	B	۲	۳۴	-	۰
۵	C	۱	۳۸/۵	۰/۶	-
۶	C	۱	۳۸/۵	-	۰
۷	D	۰/۵	۴۲	۰/۶	-
۸	D	۰/۵	۴۲	-	۰
۹	E	صفر	۴۷	۰/۶	-
۱۰	E	صفر	۴۷	-	۰



شکل ۱۱: هندسه مدل

به منظور انجام تحلیل‌ها از مدل رفتاری موهر-کولمب در رفتار مواد استفاده شده است. مدل موهر-کولمب یکی از مرسوم‌ترین مدل‌های رفتاری مکانیک خاک به شمار می‌رود که دارای ۵ پارامتر اصلی بوده و به صورت ارتجاعی خمیری کامل است.

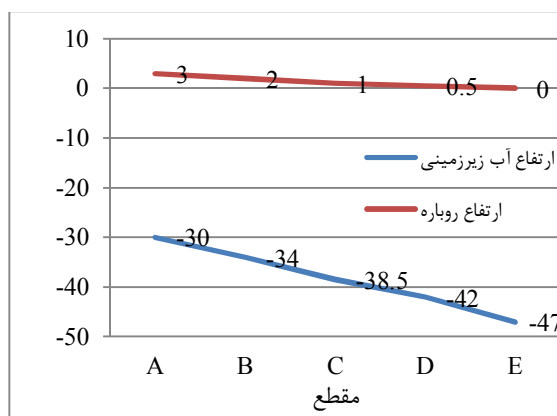
۱۴- اطلاعات مربوط به مصالح بکار رفته

اطلاعات مربوط به خاک دربرگیرنده بر طبق اطلاعات جدول (۴)، لیس گیردها بر طبق اطلاعات جدول (۵) و بتن پوششی تونل بر طبق اطلاعات جدول (۶) در مدل تعریف شد.

جدول ۴: اطلاعات خاک دربرگیرنده تونل

پارامتر	نشانه	لایه L1	لایه L2	واحد
مدل مواد	Model	موهر کولمب	موهر کولمب	-
نوع رفتار مواد	Type	زهکشی شده	زهکشی شده	-
وزن مخصوص غیراشباع	γ_{unsat}	۲۱	۲۱	kN/m ³
وزن مخصوص اشباع	γ_{sat}	۲۲/۴	۲۲/۴	kN/m ³
نفوذپذیری قائم	K_y	۰/۰۸۶	۰/۰۸۶	m/day
نفوذپذیری افقی	K_x	۰/۰۸۶	۰/۰۸۶	m/day
مدول یانگ	E_{ref}	۱۱۳۸۰۰	۲۵۰۳۰۰	kN/m ²
نسبت پواسون	ν	۰/۳۵	۰/۳۵	-
چسبندگی	c_{ref}	۷	۷	kN/m ²
زاویه اصطکاک	ϕ	۴۰	۴۰	°
زاویه اتساع	ψ	۱۰	۱۰	°
ضریب کاهش مقاومت	R_{inter}	-	۰/۴۵	-

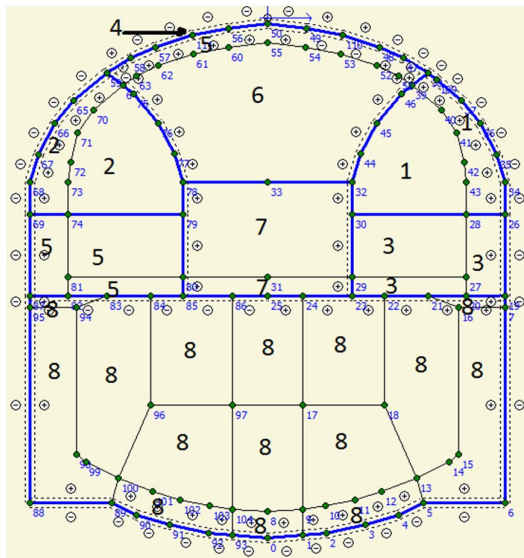
نمودار تغییرات روباره (با فرض مقطع E به عنوان مبدا) و تغییرات آب زیرزمینی در طول ایستگاه در شکل (۱۰) قابل مشاهده هستند.



شکل ۱۰: تغییرات روباره و آب زیرزمینی در طول ایستگاه

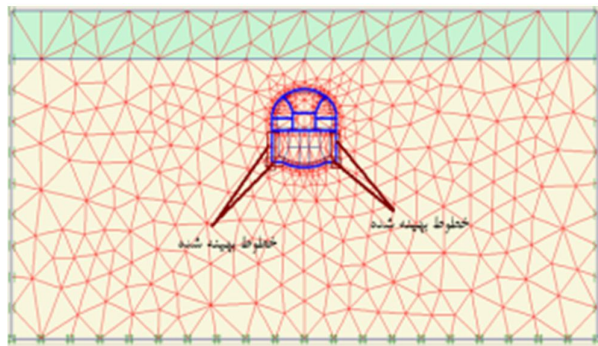
۱۳- ایجاد هندسه تونل

بر اساس نقشه‌های رسم شده در محیط نرم‌افزار با استفاده از مختصات تونل، هندسه آن در محیط نرم‌افزار رسم می‌شود. بطور تقریبی می‌توان فاصله مرزهای مدل از تونل را از طریق رابطه کرش مشخص کرد. بر طبق این رابطه فاصله مرزهای کناری از مرکز تونل ۱۰ برابر شعاع متوسط تونل در نظر گرفته می‌شود بنابراین ابعاد در نظر گرفته‌شده در این مدل ۸۰ متر در



شکل ۱۲: مقطع تونل با در نظر گرفتن فصول مشترک و مراحل حفاری

پس از اعمال شرایط مرزی و بسته شدن اطراف مدل، مش‌بندی المان محدود به صورت FINE انجام می‌شود. عملیات مش‌بندی بر اساس روش کرنش صفحه‌ای و با المان ۱۵ گرهی انجام شد. برای دقت بیشتر المان‌ها در گوشه‌های پایین در کنار تونل، مش خطوط مورد نظر با استفاده از گزینه REFINE LINE، بهینه می‌شوند. محل این بهینه‌سازی‌ها در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳: مش‌بندی المان محدود تونل به صورت Fine

پس از وارد کردن وزن مخصوص آب با مقدار ۱۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب، سطح ایستایی با ارتفاع ۳۰ متر از سطح زمین در مقطع A، در مدل اعمال می‌شود تا شرایط اولیه برای مدل ایجاد گردد.

در تمام ۸ فاز، محاسبات میانی و جابجایی‌های فازهای قبلی در نظر گرفته شده‌اند و تمام رفتارهای زهکشی نشده به حساب آورده شده‌اند. نوع بارگذاری فازها به صورت ساختاری مرحله‌ای و نوع محاسبات از نوع پلاستیک هستند و حداکثر

جدول ۵: اطلاعات لتیس گیردهای سازه نگهدار

پارامتر	نشانه	T100	T140	T170	واحد
نوع رفتار مواد	Material Type	الاستیک	الاستیک	الاستیک	-
سختی نرمال	EA	$23/88 \times 10^6$	$43/33 \times 10^6$	$40/59 \times 10^6$	kN/m
سختی خمشی	EI	$497/4 \times 10^3$	1365×10^3	$2/444 \times 10^6$	kN/m ² /m
ضخامت معادل	d	۰/۲۵	۰/۷	۰/۸۵	m
وزن	w	۲۵	۲۵	۲۵	kN/m/m
نسبت پواسون	ν	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	-
نوع رفتار مواد	Material Type	الاستیک	الاستیک	الاستیک	-

ادامه جدول ۵: اطلاعات لتیس گیردهای سازه نگهدار

سختی نرمال	EA	$47/75 \times 10^6$	$71/63 \times 10^6$	$16/71 \times 10^6$	kN/m
سختی خمشی	EI	$3/979 \times 10^6$	$0/1343 \times 10^6$	$0/1706 \times 10^6$	kN/m ² /m
ضخامت معادل	d	۱	۰/۱۵	۰/۳۵	m
وزن	w	۲۵	۲۵	۲۵	kN/m/m
نسبت پواسون	ν	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	-

جدول ۶: اطلاعات بتن پوششی تونل

پارامتر	نشانه	Concrete	واحد
مدل مواد	Model	الاستیک خطی	-
نوع رفتار مواد	Type	بدون تخلخل	-
وزن مخصوص غیراشباع	γ_{unsat}	۲۵	kN/m ³
مدول یانگ	E_{ref}	۲۳۴۲۰۰۰۰	kN/m ²
نسبت پواسون	ν	۰/۱۸	-
چسبندگی	c_{ref}	۷	kN/m ²

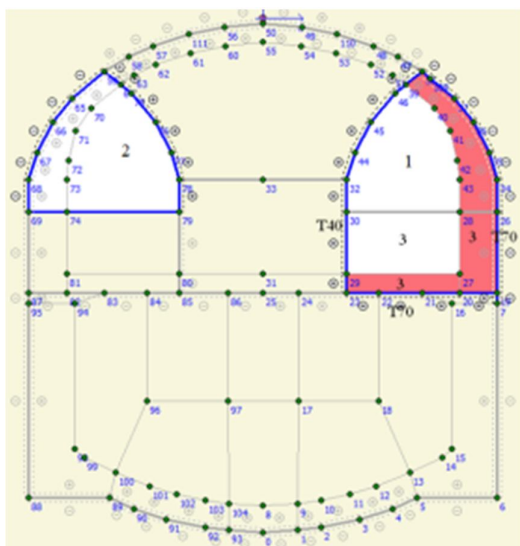
۱۵- فرآیند بارگذاری مقطع

پس از اعمال سطوح مشترک بین مواد، شکل مقطع تونل به صورت شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. بخش‌هایی که در طی هر فاز حفاری می‌شوند نیز در این شکل، مشاهده می‌شوند.

تعداد مراحل، ۲۵۰ مرحله انتخاب شدند.

۱۶-۳- فاز سوم

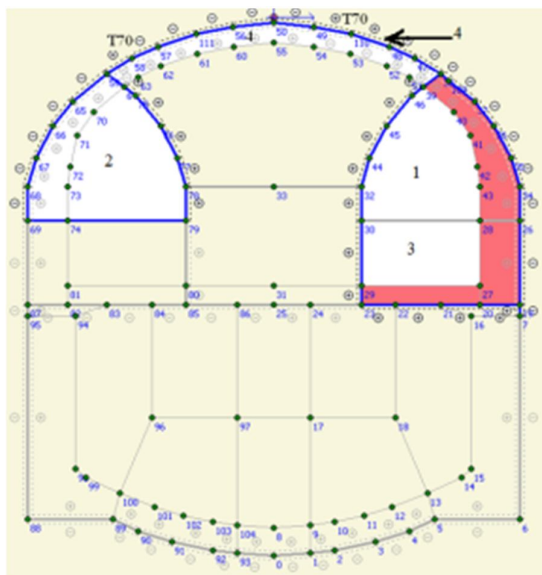
در فاز سوم، پس از برداشتن لتیس کف گالری شماره ۱، بخش شماره ۳ حفاری و لتیس‌های اطراف نصب و بتن‌ریزی آن مانند شکل (۱۶) انجام می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این فاز برابر ۱۱/۰۵ میلی‌متر در کف گالری ۲ است.



شکل ۱۶: فاز سوم حفاری

۱۶-۴- فاز چهارم

در فاز چهارم، بخش شماره ۴ حفاری و لتیس‌های اطراف آن مانند شکل (۱۷) نصب می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این فاز برابر ۳۵/۵۴ میلی‌متر در تراز سقف تونل است.

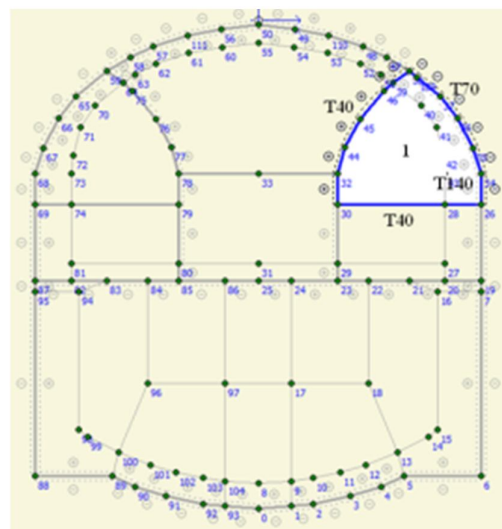


شکل ۱۷: فاز چهارم حفاری

۱۶-۱- مراحل حفاری

۱۶-۱- فاز اول

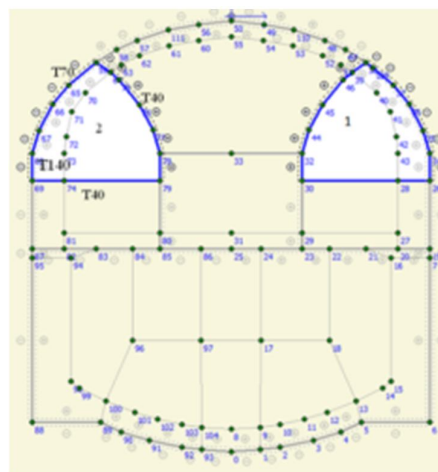
در فاز یکم، بخش شماره ۱ حفاری و لتیس‌های اطراف آن مانند شکل (۱۴) نصب می‌شود. حداکثر میزان جابجایی در پایان این فاز این فاز، ۱۱/۳۷ میلی‌متر در کف گالری است.



شکل ۱۴: فاز یکم حفاری

۱۶-۲- فاز دوم

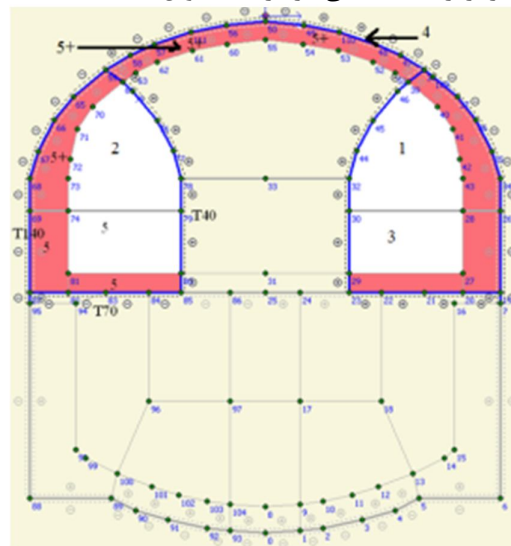
در فاز دوم، بخش شماره ۲ حفاری و لتیس‌های اطراف آن مانند شکل (۱۵) نصب می‌شود. چگونگی حفاری و نصب لتیس‌ها در این فاز، مانند فاز یکم است. حداکثر میزان جابجایی در پایان این فاز برابر ۱۱/۱۸ میلی‌متر در کف گالری شماره ۱ است.



شکل ۱۵: فاز دوم حفاری

۱۶-۵- فاز پنجم

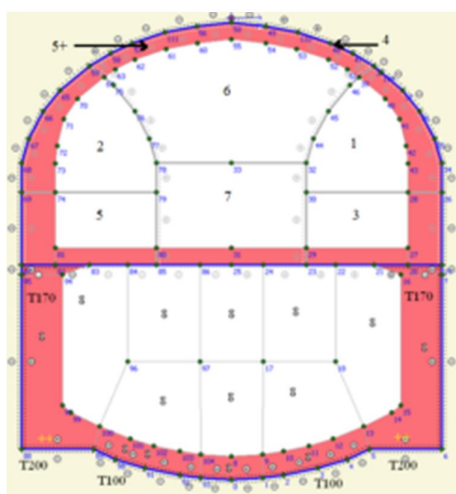
در فاز پنجم، بخش شماره ۵ حفاری و به همراه سقف تونل مانند شکل (۱۸) بتن‌ریزی می‌شوند. حداکثر جابجایی در پایان این فاز برابر ۳۷/۳۵ میلی‌متر در سقف تونل است.



شکل ۱۸: فاز پنجم حفاری

۱۶-۸- فاز هشتم

در فاز هشتم، بخش زیرین تونل به صورت یکجا، حفاری و لتیس‌های اطراف آن نصب و بتن‌ریزی آن مانند شکل (۲۱) انجام می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این مرحله برابر ۳۷/۰۱ میلی‌متر در سقف است.



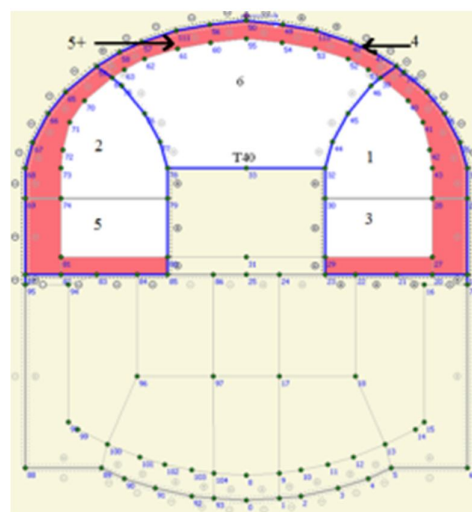
شکل ۲۱: فاز هشتم حفاری

۱۷- نتایج بدست آمده و بررسی آن‌ها

شکل‌های (۲۲) تا (۲۷) مقادیر نهایی پارامترها را برای تحلیل حالت ۱ نشان می‌دهند. سایر اشکال برای حالات دیگر

۱۶-۶- فاز ششم

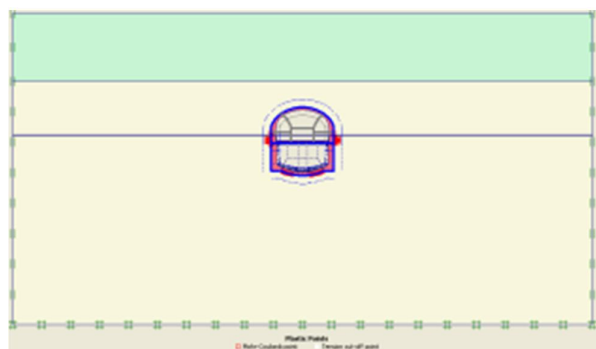
در فاز ششم، بخش شماره ۶ حفاری و لتیس کف آن مانند شکل (۱۹) نصب می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این فاز ۳۶/۳۶ میلی‌متر در سقف تونل است.



شکل ۱۹: فاز ششم حفاری

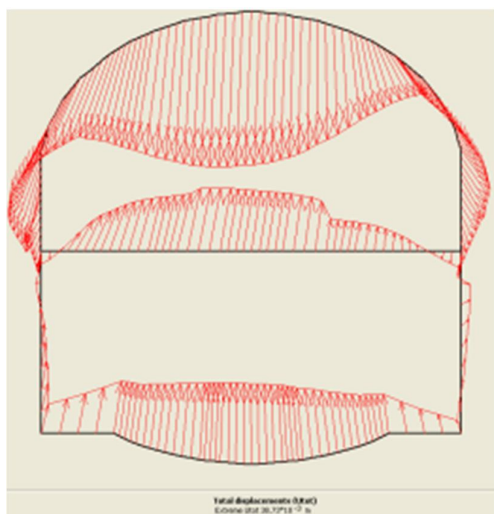
۱۶-۷- فاز هفتم

در فاز هفتم، بخش شماره ۷ حفاری و لتیس‌های اطراف برداشته و بتن‌ریزی آن مانند شکل (۲۰) انجام می‌شود. در



شکل ۲۴: نقاط پلاستیک برای تحلیل شماره ۱

از شکل (۲۵) برداشت می‌شود که طبقه فوقانی تونل، میل به همگرایی دارد. به خاطر فشار از پایین، در طبقه تحتانی تونل، میل به حرکت به سمت داخل تونل دارد. اما در کناره‌های آن این تمایل، کمتر است که می‌تواند به دلیل تحمل فشار توسط لتیس‌های نصب‌شده در طبقه بالایی تونل باشد.

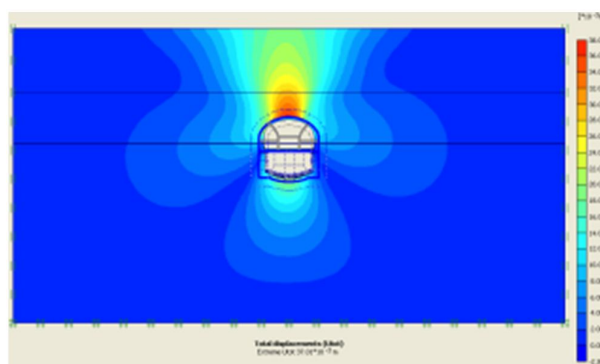


شکل ۲۵: جابجایی دیواره‌ها برای تحلیل شماره ۱ که با مقیاس ۲۰۰ برابر بزرگ شده است

توجه به دو شکل (۲۶) و (۲۷) نشان می‌دهد که نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی با یکدیگر مرتبط بوده و در جهت عکس یکدیگر هستند. مشاهده می‌شود که هر دو پارامتر، در نقاط گوشه پایینی هر دو طبقه مقادیر زیادی دارند. علت زیاد بودن هر دو پارامتر در قسمت راست سقف تونل می‌تواند به این دلیل باشد که چون این بخش از تونل، تاج فاز یکم حفاری بوده و از آغاز حفاری تحت تنش قرار گرفته، پس از پایان حفاری تونل نیز همچنان بیش‌ترین تنش به آن وارد شده و بیش‌ترین خمش را دارد.

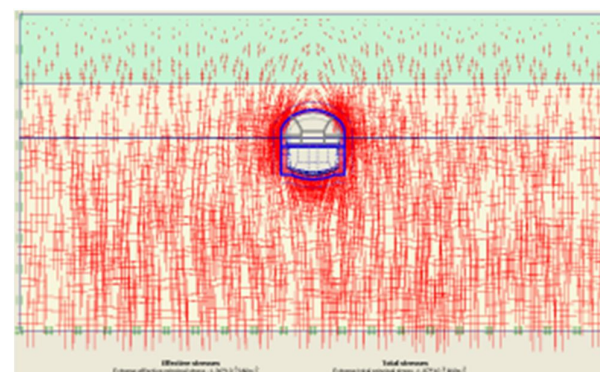
تحلیل به دلیل مشابهت با اشکال این تحلیل، در بخش پیوست آورده شده‌اند.

با مشاهده شکل (۲۲) مشخص می‌شود که حداکثر مقدار جابجایی برابر $37/01$ میلی‌متر در سقف تونل است. همچنین، عمده جابجایی برای قسمت فوقانی تونل اتفاق می‌افتد و جابجایی زیادی در طبقه تحتانی تونل وجود ندارد. این موضع، بیانگر این نکته است که عمده فشار وارده به طبقه فوقانی تونل وارد می‌شود.



شکل ۲۲: جابجایی نهایی برای تحلیل شماره ۱

شکل (۲۳) نمایانگر تمرکز شدید تنش‌های کل و موثر در اطراف و زیر تونل است. ولی در سقف تمرکز تنش کمتر است.



شکل ۲۳: تنش کل و موثر برای تحلیل شماره ۱

همانطور که در شکل (۲۴) مشاهده می‌شود، نقاط پلاستیک، بیشتر در کناره‌ها و زیر تونل قرار دارند. که با مقایسه نتایج آن با شکل (۲۳) می‌توان گفت که احتمالاً این نقاط به خاطر تمرکز تنش در این ناحیه ایجاد شده‌اند.

تحلیل در جدول (۶) نشان داده شده‌اند.

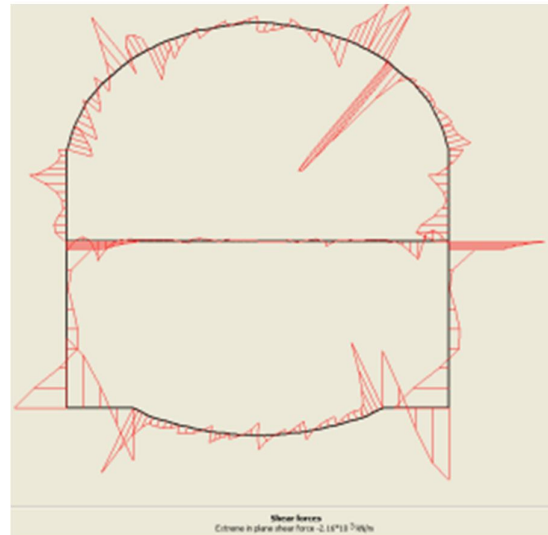
جدول ۷: مقادیر بدست آمده در ۱۰ حالت بارگذاری پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

پارامتر شماره	بیش‌ترین جابجایی کل ($10^{-3} \times m$)	بیش‌ترین تنش موثر ($10^3 \times kN/m^2$)	بیش‌ترین جابجایی دیواره‌ها ($10^{-3} \times m$)
۱	۳۷/۰۱	-۱/۸۷	۳۸/۷۳
۲	۳۶/۳۳	-۱/۸۶	۳۸
۳	۳۴/۹۹	-۱/۸۴	۳۶/۶۳
۴	۳۴/۳۷	-۱/۸۳	۳۵/۹۷
۵	۳۲/۷۶	-۱/۸۲	۳۴/۳۳
۶	۳۲/۰۸	-۱/۸۰	۳۳/۶۰
۷	۳۱/۸۸	-۱/۸۰	۳۳/۴۱
۸	۳۱/۲۳	-۱/۷۹	۳۲/۷۳
۹	۳۰/۷۲	-۱/۷۷	۳۲/۱۸
۱۰	۳۰/۷۱	-۱/۷۷	۳۲/۱۸

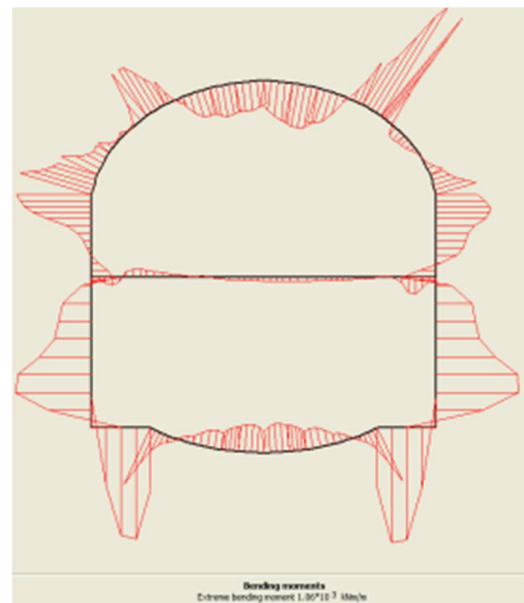
ادامه جدول ۷: مقادیر بدست آمده در ۱۰ حالت بارگذاری پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

پارامتر شماره	بیش‌ترین نیروی برشی ($10^3 \times kN/m$)	بیش‌ترین گشتاور خمشی (kNm/m)
۱	-۲/۱۶	۱۰۶۰
۲	-۲/۱۲	۱۰۴۰
۳	-۲/۱۰	۱۰۳۰
۴	-۲/۰۵	۱۰۱۰
۵	-۲/۰۲	۹۹۱
۶	-۱/۹۸	۹۸۴
۷	-۱/۹۸	۹۷۱
۸	-۱/۹۵	۹۷۰
۹	-۱/۹۲	۹۵۸
۱۰	-۱/۹۲	۹۵۸

جهت مقایسه رفتار تونل در حالت بارگذاری ترافیکی و استاتیکی، از نمودارهای مقایسه‌ای هر یک از پارامترها استفاده می‌شود (شکل‌های ۲۸ تا ۳۲). ملاحظه می‌شود که عموماً و تا زمانی که آب در اطراف تونل وجود دارد، مقادیر ترافیکی پارامترها بیشتر از جابجایی استاتیکی است. پس از خروج آب از مقطع تونل، اختلاف بین پارامترها تقریباً صفر خواهد بود که



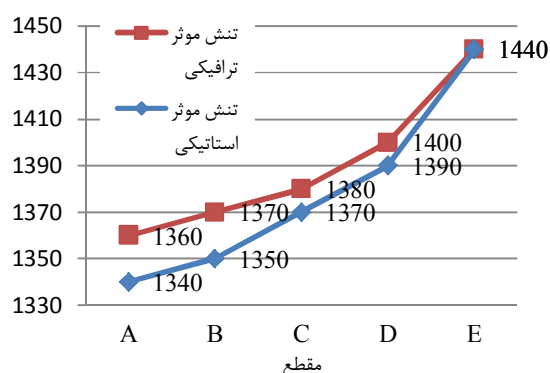
شکل ۲۶: نیروهای برشی برای تحلیل شماره ۱ که با مقیاس ۲۰۰ برابر بزرگ شده است



شکل ۲۷: گشتاورهای خمشی برای تحلیل شماره ۱ که با مقیاس ۲۰۰ برابر بزرگ شده است

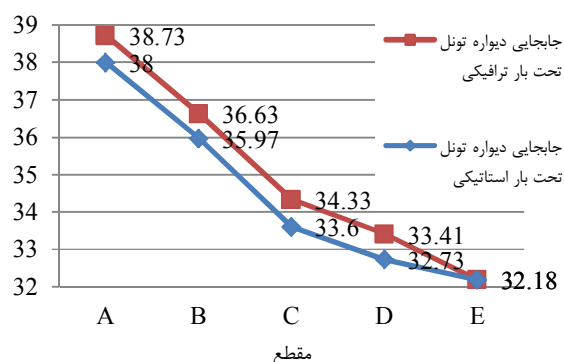
مقادیر عددی نتایج بدست آمده را می‌توان به صورت خلاصه در جدول (۶) مشاهده کرد.

جدول (۶) مقادیر بدست آمده در ۱۰ حالت بارگذاری پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت مراحل تحلیل ۹ آنالیز دیگر نیز دقیقاً مانند این آنالیز است. برای نتیجه‌گیری، مقایسه و قضاوت در مورد میزان تأثیر هر یک از عوامل مورد نظر، مقدار نهایی پارامترهای هر ۱۰ حالت



شکل ۲۹: مقایسه تنش موثر ترافیکی و استاتیکی پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

بر اساس شکل (۱۰) و با مشاهده شکل (۳۰) جابجایی دیواره تونل در حالت ترافیکی بیش از استاتیکی است. علت زیاد شدن شیب کاهش تنش در ابتدای نمودار می‌تواند به خاطر روباره زیاد در این مقاطع باشد.



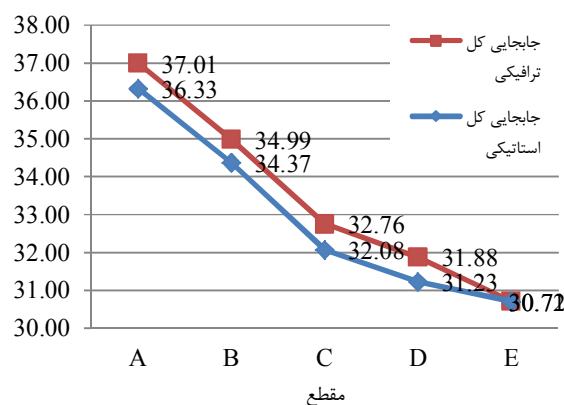
شکل ۳۰: مقایسه جابجایی ترافیکی و استاتیکی دیواره تونل پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

بر اساس شکل (۱۰) و با مشاهده شکل (۳۱) تنش برشی ترافیکی دارای مقادیر بیشتری نسبت به تنش برشی استاتیکی است. با افزایش عمق سطح ایستایی، اختلاف تنش‌های برشی کاهش می‌یابد. شیب زیاد پارامترها در ابتدای نمودار بیانگر تأثیر زیاد روباره بر تنش‌ها است.

نشانه تأثیر حضور آب بر این پارامتر است. شیب این پارامترها هم، متناسب با روباره، تغییر می‌کند.

در این نمودارها باید به این نکته توجه شود که پارامترهایی که شیب آن‌ها ثابت است نشان دهنده استقلال آن‌ها از فاکتور تغییر روباره و وابسته به تغییر آب زیرسطحی است و پارامترهایی که شیب آن‌ها متغیر است نشان دهنده استقلال آن‌ها از فاکتور تغییر آب زیرسطحی و وابستگی آن به تغییر روباره است.

بر اساس شکل (۱۰) و با مشاهده شکل (۲۸) عموماً و تا زمانی که آب در اطراف تونل وجود دارد، جابجایی ترافیکی ۰/۷ میلی‌متر بیشتر از جابجایی استاتیکی است. پس از خروج آب از مقطع تونل، اختلاف بین جابجایی‌ها تقریباً صفر خواهد بود که نشانه تأثیر آب بر این پارامتر است. شیب این پارامتر هم، متناسب با روباره، تغییر می‌کند. نسبت بار ترافیکی به بار استاتیکی در مقطع کم شده و در نتیجه، اثر جابجایی مربوط به بار ترافیکی کم می‌شود.



شکل ۲۸: مقایسه جابجایی ترافیکی و استاتیکی پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

بر اساس شکل (۱۰) و با مشاهده شکل (۲۹) مقادیر تنش موثر ترافیکی بیش از تنش استاتیکی است. با افزایش یکنواخت عمق سطح ایستایی و کاهش یکنواخت بار روباره، تنش موثر افزایش می‌یابد. زیرا با وجود خروج آب از میان حفرات، روباره کاهش یافته و امکان تأثیر بیشتر فشار موثر آب را به سازه می‌دهد. علت زیاد شدن شیب افزایش تنش می‌تواند به خاطر صفر شدن مقدار روباره باشد.

زیرزمینی باعث اختلاف ثابتی میان مقادیر نهایی پارامترهای حاصل تأثیر از بارهای ترافیکی و استاتیکی می‌شود. با افزایش عمق آب زیرزمینی و خروج آن از محدوده ایستگاه تمام پارامترها با یکدیگر برابر می‌شوند. این موضوع می‌تواند نمایانگر تأثیر مهم آب زیرزمینی بر بیشتر پارامترهای نهایی باشد.

در تمام نمودارها، مقادیر نهایی پارامترهای حاصل از تأثیر بارهای ترافیکی، بیشتر از بارهای استاتیکی است.

نمودارهایی که در آن‌ها شیب خطوط ثابت هستند، آب زیرزمینی تأثیر بیشتری نسبت به تغییر روباره دارد. زیرا تغییر در سطح آب زیرزمینی یکنواخت فرض شده و تغییر در روباره، شیب دار است.

علت تأثیر کمتر آب زیرزمینی بر گشتاور خمشی به دلیل تأثیرپذیری بیشتر گشتاور خمشی از جابجایی‌های ایجاد شده از تونل است.

حداکثر مقدار نشست در سطح زمین بالای تونل ۲۰ میلی‌متر است که با توجه به عمق تونل و قرار گرفتن آن در زیر خیابان و نبود ساختمان در کنار این سازه، این مقدار نشست، مجاز و قابل چشم‌پوشی است.

تغییر در آب زیرسطحی، بیشتر بر گشتاور خمشی و تنش کل تأثیر می‌گذارد. زیرا شیب نمودار این پارامترها تقریباً ثابت است.

تغییر روباره بر جابجایی دیواره‌ها و جابجایی کل تأثیرگذار است. زیرا شیب نمودار این پارامترها بسته به تغییر روباره، تغییر می‌کند.

تنش برشی و تنش موثر تابع هر ۲ عامل آب زیرسطحی و روباره هستند.

بارهای ترافیکی، تأثیر بیشتری بر تنش موثر، تنش کل، گشتاورهای خمشی و جابجایی دیواره تونل دارند.

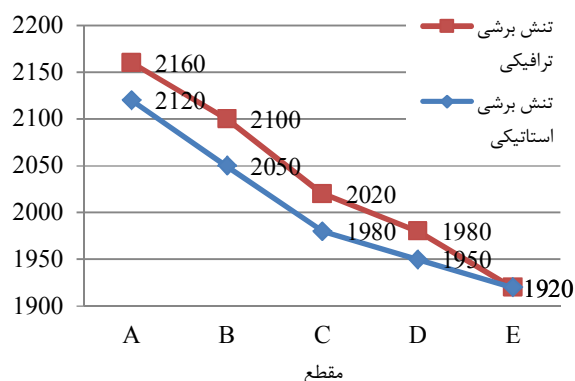
۱۹- مراجع

[1] www.Tehranmetro.com

[۲] شرکت راه‌آهن شهری تهران و حومه (مترو)، شهرپرو ۱۳۸۵، گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک در شمال ایستگاه XI - پروژه توسعه شمالی خط ۱ متروی تهران، شرکت مهندسين مشاور دریا خاک پی، صص ۱-۲۳

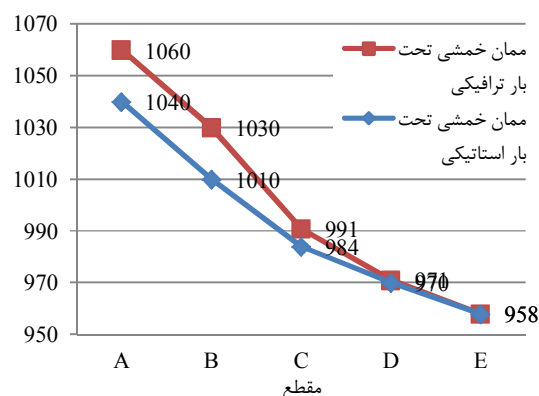
[3] Lipponen, A., Manninen S., Niini H., Rönkä E., 2005, "Effect of water and geological factors on the long-term stability of fracture zones in the Päijänne Tunnel", Finland: a case study, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 42, Issue 1, January, Pages 3-12

[4] Ghorbani M., Sharifzadeh M., Yasrobi S., Daiyan M., 2012, "Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunneling hazards in



شکل ۳۱: مقایسه تنش برشی ترافیکی و استاتیکی پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

بر اساس شکل (۱۰) و با مشاهده شکل (۳۲) تغییر روباره مهم‌ترین عامل در مقادیر گشتاور خمشی است. شیب زیاد پارامترها در ابتدای نمودار بیانگر تأثیر زیاد روباره بر گشتاورهای خمشی است.



شکل ۳۲: مقایسه گشتاور خمشی ترافیکی و استاتیکی پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

۱۸- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده، با به‌کارگیری لتیس برای اجرای سیستم نگهداری موقت و بتن برای اجرای سیستم نگهداری دائم در تمام مقاطع مورد نظر در خاک موجود، تونل پایدار خواهد بود.

با ۱۹/۸ متر ارتفاع و ۱۷/۵ متر عرض برای این ایستگاه، در مقطع A که ارتفاع خاک آن ۲۲ متر از سقف تونل است با ۳ متر روباره و ۳۳ متر عمق آب زیرزمینی از سطح، با احتساب بار ترافیکی حداکثر جابجایی برابر ۳۷ میلی‌متر (۳/۷ سانتیمتر یا ۰/۰۳۷ متر) برآورد شد.

در تمام نمودارها به جز گشتاور خمشی، وجود آب

Mining Sciences, Volume 45, Issue 4, , Pages 486-494

[10] Ibrahim Ocak, 2008, "Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro", Tunneling and Underground Space Technology, Volume 23, Issue 6, , Pages 674-681

[۱۱] شرکت راه‌آهن شهری تهران و حومه (مترو)، مرداد ۱۳۸۷، گزارش نهایی سازه ایستگاه XI خط ۱ متروی تهران، شرکت مهندسی مشاور دریا خاک پی، صص ۱-۴۶

[۱۲] بهپور، م؛ روحی مهر، الف؛ وفايي پور، ر؛ ۱۳۸۵، مرجع کامل Plaxis V8، انتشارات فروزش، صص ۴۸-۱۳۳

[13] Plaxis V8, Reference Manual

[۱۴] امامی، رقيه؛ بدو، کاظم؛ ۱۳۸۷، تأثیر مسلح کننده ژئوتکستایل در رفتار خاکریز احداث شده روی بستر سست - مطالعه موردی بزرگراه شهید کلانتری ارومیه-تبریز، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، اردیبهشت ۸۷، دانشگاه تهران، صفحات ۱ الی ۸.

urban areas – The case of Niayesh road tunnel project", Tunneling and Underground Space Technology, Volume 31, September, Pages 1-8

[5] Kucuk K., Genis M., Onargan T., Aksoy C.O., Guney A., Altındağ R., 2009, "Chemical injection to prevent building damage induced by ground water drainage from shallow tunnels", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 46, Issue 7, , Pages 1136-1143

[6] Prof. ir. K.F.Wakker, 2001, "Tunnel Face Stability & New CPT Applications", Book, Technische Universiteit Delft, Civiel Ingenieur, Geboren te Amsterdam, , Pages 22-24

[7] Mohammad H. Sadaghiani, Saleh Dadizadeh, 2010, "Study on the effect of a new construction method for a large span metro underground station in Tabriz-Iran", Tunneling and Underground Space Technology, Volume 25, Issue 1, , Pages 63-69

[8] David N. Chapman, Sung K. Ahn, Dexter V.L. Hunt, Andrew H.C. Chan, 2006, "The use of model tests to investigate the ground displacements associated with multiple tunnel construction in soil", Tunneling and Underground Space Technology, Volume 21, Issues 3-4, , Page 413

[9] Shu-cai Li, Ming-bin Wang, 2008, "An elastic stress-displacement solution for a lined tunnel at great depth", International Journal of Rock Mechanics and

1. Centre Dividing wall NATM
2. Hardening Soil