

### امکان‌سنجی استفاده از سربار مصنوعی برای کاهش عمق شفت ورودی ماشین حفار مکانیزه ( مطالعه موردی شفت غربی خط ۲ قطار شهری تبریز )

هوشنگ کاتبی<sup>\*۱</sup>؛ امیر حسن رضایی<sup>۲</sup>؛ مسعود حاجی علیلو بناب<sup>۳</sup>؛ ابوالفضل تارى فرد<sup>۴</sup>

۱- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۴- کارشناس ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۰۵/۱۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی	چکیده
تونلسازی مکانیزه مدلسازی عددی سرباره مصنوعی شفت ورودی ماشین حفار ABAQUS	تونلسازی مکانیزه به دلیل مزایای فراوان نسبت به روش‌های حفاری سنتی بعنوان مهمترین روش تونلسازی دهه‌های اخیر، بویژه در مناطق شهری، مطرح شده است. معمولاً در پروژه‌های حفاری مکانیزه برای شروع عملیات حفاری از شفت‌های ورودی استفاده می‌شود. احداث این شفت‌ها در برخی شرایط ژئوتکنیکی زمین و بویژه با وجود آب زیرزمینی، با مشکلات اجرایی همراه بوده و از نظر اقتصادی نیز هزینه بالایی دربر خواهد داشت. این امر با گسترش روزافزون کاربرد تونل‌های با قطر زیاد که نیازمند سربار بیشتر و در نتیجه شفت‌های عمیق‌تر می‌باشند بیشتر قابل توجه است. کاربرد سرباره مصنوعی در مواردی که فضای مناسب وجود داشته باشد می‌تواند بعنوان یک راهکار جایگزین سبب کاهش عمق ترانشه مورد نیاز شود. در تحقیق حاضر با مدلسازی عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS کاربرد سرباره مصنوعی با مصالح خاک-سیمان به منظور کاهش عمق شفت ورودی ماشین حفار در شفت غربی پروژه خط ۲ مترو تبریز، بصورت موردی امکان‌سنجی شده است. بر اساس نتایج حاصل و بررسی پایداری کلی شفت، نشست ایجاد شده در سطح سرباره و انحراف احتمالی دستگاه بطور موفقیت آمیزی می‌توان از سرباره مصنوعی برای کاهش عمق شفت ورودی استفاده کرد.

#### ۱- مقدمه

مطالعه می‌باشد.

تونلسازی مکانیزه به دلیل مزایای فراوان نسبت به روش‌های حفاری و نگهداری سنتی؛ از جمله امکان حفاری در انواع مختلف خاک‌ها و شرایط سخت ژئوتکنیکی مانند تراز آب زیرزمینی بالا، زمین‌های نرم یا عمق سربار کم و امکان کنترل نشست‌های سطحی؛ بعنوان مهمترین روش تونلسازی دهه‌های اخیر بویژه در مناطق شهری مطرح شده است. معمولاً در روش حفاری مکانیزه انواع شفت‌ها از قبیل شفت‌های ورودی، شفت‌های خروجی دستگاه، شفت‌های تغذیه، شفت‌های تهویه و ... برای اهداف مختلف بکار برده

با افزایش روز افزون شهرنشینی، گسترش شهرها و نیاز فزاینده به زمین بویژه در مناطق شلوغ و پرتراکم شهرها، استفاده از فضای زیرزمینی و پروژه‌های تونلسازی برای اهداف مختلف از قبیل ایجاد راه‌های ارتباطی، خطوط مترو، تاسیسات زیربنایی و زیرساخت‌ها افزایش چشمگیری در سال‌های اخیر داشته است. در کشور ایران نیز پروژه‌های تونلسازی با شتاب زیادی در حال افزایش بوده و علاوه بر ۵ کلان شهر کشور در اکثر شهرهای بزرگ نیز پروژه‌های تونلسازی چشمگیری برای اهداف مختلف در حال اجرا یا

\* آذربایجان شرقی، تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران، کدپستی: ۵۱۶۶۶/۱۶۴۷۱، شماره تلفن: ۰۴۱۱)۳۳۹۲۵۵۳، نمابر:

۰۴۱۱)۳۳۴۴۲۸۷ آدرس پست الکترونیک: [katebi@tabrizu.ac.ir](mailto:katebi@tabrizu.ac.ir)

برداری شفت کاهش می‌یابد. در این حالت علاوه بر کاهش مشکلات اجرایی، صرفه‌جویی قابل توجهی از نظر زمانی و اقتصادی انجام خواهد گرفت.

در این مطالعه به صورت موردی استفاده از سربار مصنوعی برای شفت غربی پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز با مدلسازی عددی و کاربرد نرم افزار المان محدود *ABAQUS* نسخه ۶.۱۰ امکان‌سنجی شده است. در مدل ساخته شده مشخصات هندسی تونل (از قبیل قطر و مشخصات پوشش تونل)، پارامترهای مختلف دستگاه (از قبیل قطر حفاری، میزان اضافه حفاری و مشخصات شیلد)، مشخصات ژئوتکنیکی خاک محدوده شفت و همچنین مشخصات دوغاب تزریقی برابر مشخصات پروژه انتخاب شده است تا پارامترهای انتخاب شده منطبق بر واقعیت باشد. به منظور امکان‌سنجی استفاده از سربار مصنوعی، پارامترهای نشست ایجاد شده در سطح سرباره، جابجایی محدوده اطراف تونل، پایداری کلی سرباره در برابر فشار سینه‌کار و فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت‌ها، نشست و انحراف احتمالی ماشین حفار به عنوان معیار ارزیابی بررسی شده است.

## ۲- مشخصات شفت ورودی مورد مطالعه

شهر تبریز با مساحت ۱۶۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۱۶۰۰۰۰۰ نفر یکی از شهرهای بزرگ و پر جمعیت ایران در شمالغرب این کشور می‌باشد. بر اساس مطالعات اولیه ۴ خط مترو برای این شهر پیش بینی شده است. پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز از غرب به شرق تبریز به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر از منطقه قراملک در غرب تبریز شروع شده و در محدوده نمایشگاه بین المللی تبریز خاتمه می‌یابد. طول مسیر پروژه بصورت مکانیزه توسط دو دستگاه سپر تعادلی زمین به قطر حدود ۹/۵ متر حفاری خواهد شد. برای شروع حفاری از بخش غربی مسیر در محل دپو، شفت ورودی دستگاه ایجاد می‌شود که در این مطالعه امکان استفاده از سربار مصنوعی در این بخش با توجه به شرایط محیطی و وجود فضای مناسب بررسی شده است. در شکل ۱ نمای کلی خط ۲ به همراه موقعیت دپوی غربی ارائه شده است.

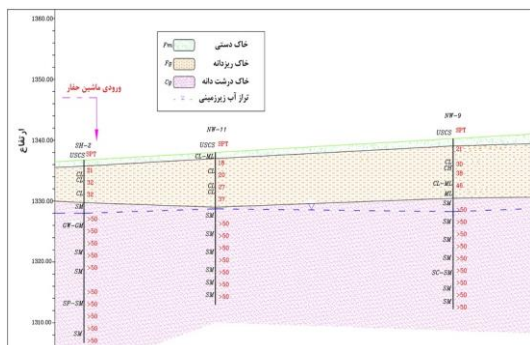
بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در ناحیه مورد مطالعه، لایه سطحی تا عمق ۷ متری از خاک ریزدانه رسی و لایه‌های زیرین عمدتاً از رسوبات آبرفتی درشت‌دانه

می‌شود. انتخاب نوع، عمق و ابعاد این شفت‌ها با توجه به عوامل مختلفی از جمله شرایط محیطی، فضای موجود، مشخصات ماشین حفار و شرایط ژئوتکنیکی منطقه و بویژه تراز آب زیرزمینی انجام می‌گیرد [1]، [2]. همچنین روش‌های متداول مختلفی برای ساخت و احداث شفت‌ها با عمق و ابعاد مختلف گسترش یافته است [3]، [4].

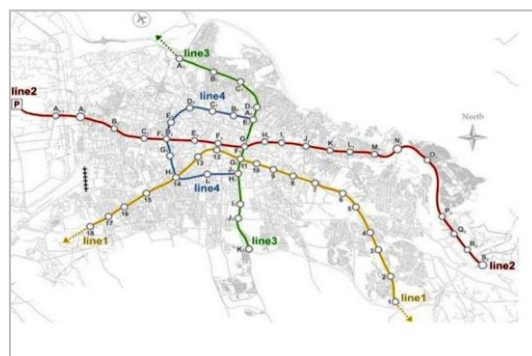
در پروژه‌های تونلسازی مکانیزه برای شروع بکار حفاری از شفت‌های ورودی ماشین حفار استفاده می‌شود. هدف عمده ایجاد شفت ورودی تامین سربار مورد نیاز برای شروع حفاری می‌باشد که سبب کاهش نشست‌های زمین و آسیب به سازه‌های سطحی می‌گردد. علاوه بر این در ماشین‌های حفار مکانیزه با سیستم سپر تعادلی زمین (*Earth Pressure Balance TBM-EPB*) و در حالت وجود آب زیرزمینی در سینه‌کار، به منظور جلوگیری از ورود آب به درون سپر ماشین باید امکان شروع حفاری به صورت تعادل فشار زمین نیز فراهم گردد. معمولاً سربار مورد نیاز ماشین حفار متناسب با قطر حفاری انتخاب می‌شود و وابسته به سازه‌ها و تاسیسات موجود در بالای تونل حداقل سربار مورد نیاز یک برابر قطر حفاری توصیه شده است [5]، [6]. مطالعات مختلفی نیز برای ارزیابی میزان نشست‌های سطحی ایجاد شده، بعنوان مهمترین مشکل حفاری‌های با سربار کم، انجام گرفته است [5]. امروزه و با رشد تکنولوژی ماشین‌های حفار مکانیزه امکان حفاری با قطرهای بزرگ نیز فراهم شده است که این افزایش قطر سبب افزایش عمق اجرای پروژه‌ها می‌شود و در نتیجه برای احداث شفت‌های ورودی نیاز به گودبرداری با عمق زیاد خواهد بود. در شرایط مناسب ژئوتکنیکی گودبرداری شفت‌ها با سهولت و با استفاده از روش‌های متنوعی قابل اجرا می‌باشد [7]، [9]. ولی در شرایط نامناسب ژئوتکنیکی از قبیل مواجهه با خاک‌های ریزشی و سطح آب زیرزمینی بالا، این کار با مشکلات اجرایی زیادی همراه بوده و علاوه بر تحمیل هزینه‌های اجرایی زیاد معمولاً زمانبر نیز می‌باشد.

در صورت وجود فضای کافی و شرایط محیطی مناسب جهت شروع حفاری، یکی از روش‌هایی که می‌توان برای کاهش عمق شفت ورودی ماشین از آن استفاده کرد کاربرد سربار مصنوعی است که با ایجاد یک سربار مصنوعی در سطح زمین و تامین سرباره مورد نیاز حفاری عمق گود

امکان سنجی استفاده از سربار مصنوعی برای کاهش عمق شفت ورودی ماشین حفار مکانیزه (مطالعه موردی شفت غربی خط ۲ قطار شهری تبریز)



شکل ۲- پروفیل ژئوتکنیکی محدوده مورد مطالعه



شکل ۱- مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز و موقعیت دیو غربی (P)

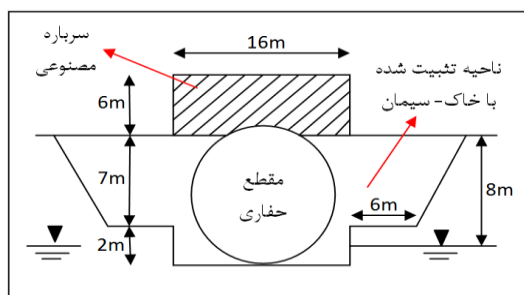
تبریز واقع شده و شیب طبیعی به سمت منطقه مورد مطالعه بوده و در اثر شیب هیدرولیکی موجود دارای سفره آب زیرزمینی وسیعی می‌باشد. به دلیل وجود آب زیرزمینی بصورت سفره باز آب همراه با نفوذپذیری بالای خاک زیرسطحی منطقه و ریزشی بودن آن، عملیات گودبرداری و پایدارسازی شفت دارای مشکلات اجرایی فراوانی می‌باشد. همچنین به دلیل طول زیاد شفت (حدود ۲۰۰ متر) استفاده از روشهای متداول پایدارسازی دیواره‌های شفت هزینه اجرایی بالایی خواهد داشت. با توجه به واقع بودن منطقه مورد بررسی در خارج از محدوده شهری و نبود سازه سطحی در مجاورت آن، نشست‌های سطحی ایجاد شده در شروع حفاری دارای اهمیت زیاد نمی‌باشد و با در نظر گرفتن حفاری موفقیت‌آمیز تونل‌های مکانیزه با میزان سرباره کم [10][10]؛ بر اساس طرح اولیه میزان سرباره برای شروع حفاری حدود نیم برابر قطر تونل در نظر گرفته شده است. بنابراین بر اساس پروفیل مسیر در طرح اولیه، عمق شفت ورودی دستگاه برابر ۱۵ متر انتخاب شده است.

(ماسه‌ای-شنی) تشکیل شده است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد، رسوبات دانه‌ای عمدتاً دارای طبقه‌بندی SM (در بعضی مناطق GM) و لایه ریزدانه CL می‌باشد. رسوبات آبرفتی این ناحیه عمدتاً از طریق رودخانه مهران رود که از دامنه‌های سپند سرچشمه می‌گیرد نهشته شده است. بر اساس نتایج آزمایشات، عدد نفوذ استاندارد در لایه‌های ماسه‌ای عمدتاً بالاتر از ۵۰ بوده و تراکم لایه ماسه‌ای با افزایش عمق بیشتر می‌گردد. در مجموع سه لایه مختلف برای خاک منطقه قابل شناسایی می‌باشد که مشخصات ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده در مدلسازی برای هر کدام از لایه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. عمق آب زیرزمینی در این ناحیه حدود ۸ متر بوده و لایه‌های آبدار تحت فشار مشاهده نشده است. در شکل ۲ پروفیل ژئوتکنیکی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به وضعیت توپوگرافی و هیدرولوژی منطقه، محدوده مورد بررسی از نظر ارتفاعی در پایین‌ترین تراز شهر

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده برای محیط اطراف تونل

پارامترها	خاک ریز دانه (عمق ۰ تا ۷ متر)	خاک دانه ای (عمق ۷ تا ۱۵ متر)	خاک درشت دانه (عمق ۱۵ تا ۴۵ متر)	خاک - سیمان
زاویه اصطکاک (درجه) $[\Phi CU]$	۲۰	۳۰	۳+۳۴	۴۰
چسبندگی $[CCU] (kPa)$	۳۵	۷	۱۰	۱۰۰
مدول الاستیسیته $(MPa)$	۲۰	۳۵	۵۰	۱۰۰۰
ضریب پواسون	۰٫۳۵	۰٫۳۳	۰٫۳	۰٫۲۵
وزن مخصوص خشک $(KN/m^3)$	۱۷	۱۷٫۵	۱۸	۲۱
وزن مخصوص اشباع $(KN/m^3)$	۲۰	۲۱	۲۱٫۵	۲۲
نفوذپذیری $(cm/s)$	$1 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-7}$

گرفته ارائه شده است. در ادامه مدل عددی استفاده شده به همراه نتایج حاصل از مدل‌سازی ارائه شده است.



شکل ۳- هندسه شفت ورودی و سرباره مصنوعی پیشنهادی

### ۴- مدل‌سازی عددی

در کنار روش‌های متداول بررسی پدیده‌های ژئوتکنیکی از قبیل مدل‌سازی فیزیکی و روش‌های تحلیلی، پیشرفت‌های سخت افزاری و نرم افزاری چشمگیر امکان مدل‌سازی عددی مسائل ژئوتکنیکی را فراهم ساخته است. با ارائه نسخه‌های جدید از نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی به همراه افزایش قدرت پردازش رایانه‌ها محققان زیادی در سال‌های اخیر به مدل‌سازی ۲ و ۳ بعدی فرآیند تونلسازی پرداخته‌اند. مدل‌سازی عددی زیادی در زمینه تونلسازی اطریشی جدید انجام شده است ولی بعلاوه رفتار بسیار پیچیده تونلسازی سپری، تعداد کمی از مدل‌سازی‌های عددی کامل برای این منظور وجود دارد [13]، [14] و [12]. در این مقاله با ایجاد یک شبیه‌سازی سه‌بعدی از حفاری تونل توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS کاربرد سرباره مصنوعی به منظور کاهش عمق ترانشه ورودی دستگاه حفار امکان سنجی شده است.

تونلسازی در عمل یک پدیده سه‌بعدی بوده و سبب می‌شود تا عملکردی سه‌بعدی در رفتار تنش-کرنش زمین در جبهه حفاری تونل بوجود آید. در حین حفاری تونل پدیده قوسی شدن زمین عمود و موازی با محور تونل به وقوع می‌پیوندد که نمی‌تواند بطور مستقیم در مدل‌های ۲ بعدی در نظر گرفته شود. در مدل‌سازی سه‌بعدی، عملیات اجرایی تونل بصورت کامل و گام به گام مدل شده و بدین ترتیب مدلی واقعی از رفتار مجموعه قابل تهیه و بررسی می‌باشد. مدل‌سازی انجام شده حاضر شامل اکثر مولفه‌های

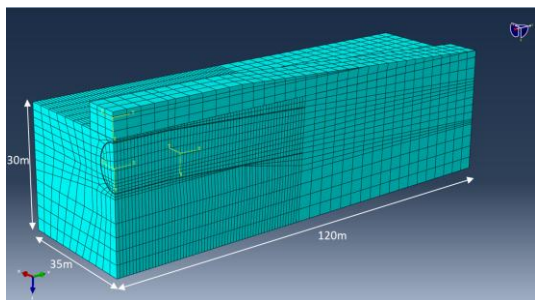
با این حال باتوجه به وضعیت خاک پایین تر از تراز ۷ متری و وجود آب زیرزمینی، احداث شفت به عمق ۱۵ متر نیز مشکل می‌باشد. در پروژه مورد مطالعه در صورتی که بتوان از سرباره مصنوعی استفاده کرد عمق شفت ورودی به حدود ۹ متر کاهش داده شده و ۶ متر سرباره اولیه مورد نیاز بوسیله سرباره مصنوعی تامین می‌شود. بر اساس ابعاد شفت ورودی در طرح اولیه (ناحیه بدون هاشور در شکل ۳) پیشنهاد می‌شود ناحیه ورودی ماشین حفار با طول و عرض ۳۰ متر از مصالح مناسب تثبیت شده و در محل حفاری تونل با استفاده از سرباره مصنوعی با ارتفاع ۶ متر ارتفاع ناحیه تثبیت شده به ۱۵ متر افزایش داده شود. هندسه پیشنهادی شفت در شکل ۳ نشان داده شده است.

سرباره مصنوعی به منظور تامین طول مورد نیاز ورود کامل سپر ماشین حفار به درون ناحیه تثبیت شده و امکان اجرای قوس قائم، به طول ۳۰ متر بصورت افقی و پس از آن بصورت شیبدار اجرا شده و بر اساس پروفیل مسیر در طول ۱۲۰ متر ارتفاع سرباره مصنوعی صفر می‌گردد.

بطور کلی در محل ورودی و شروع بکار TBM شرایط توده خاک این ناحیه می‌بایست به نحوی اصلاح گردد که توده خاک نفوذناپذیر بوده و مانع از نفوذ آب به داخل شفت گردد. همچنین توده خاک باید تا قبل از پر شدن محفظه حفاری (excavation chamber) پایداری لازم را داشته باشد و دچار گسیختگی نگردد و همزمان دارای مقاومت مینیمم باشد در حدی که ماشین حفار بتواند به راحتی عملیات حفاری را انجام دهد. با توجه به کاربرد موفق در پروژه‌های تونلسازی سنتی [11] و همچنین قیمت ارزان، سهولت و سرعت اجرا، پیشنهاد می‌گردد از سرباره مصنوعی (artificial overburden) بعنوان یک جایگزین مناسب احداث شفت با عمق زیاد استفاده گردد.

با توجه به وجود خاک‌های دانه‌ای و رسی در محل، برای احداث سرباره مصنوعی استفاده از مخلوط خاک-سیمان پیشنهاد می‌شود. با انجام آزمایشات با درصد‌های سیمان مختلف، درصد سیمان بهینه در حدود ۵ درصد تعیین شده است که می‌توان با افزودن ۱٫۵ درصد رس یک مخلوط با مشخصات مهندسی مناسب و مقاومت ۲۸ روزه کمتر از ۳ مگاپاسکال به دست آورد. در جدول ۱ مشخصات خاک تثبیت شده که در مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار

امکان سنجی استفاده از سربار مصنوعی برای کاهش عمق شفت ورودی ماشین حفار مکانیزه (مطالعه موردی شفت غربی خط ۲ قطار شهری تبریز)



شکل ۴- مدل ساخته شده به همراه مش بندی مورد استفاده

شده است. طول مدل نیز ۱۲ برابر قطر تونل انتخاب شده است. مدل ساخته شده شامل حدود ۲۸۰۰۰ المان سه بعدی و به ترتیب عرض، عمق و طولی برابر ۷۰، ۳۶ و ۱۲۰ متر می باشد که به منظور کاهش زمان تحلیل و تقارن موجود در حالت مورد بررسی نصف مدل تحلیل شده است. در شکل ۴ نمونه ای از مدل سه بعدی ساخته شده به همراه مش بندی مورد استفاده نشان داده شده است.

### ۳-۲- مدلسازی سپر ماشین

سپر ماشین حفار با استفاده از المان های پوسته ای با رفتار الاستیک خطی مدل شده است. به منظور ساده سازی هندسه مدل، سپر مخروطی شکل بصورت یک استوانه با قطر ثابت و برابر با قطر متوسط قطر سپر جلویی و انتهایی دستگاه جایگزین شده است. برای تامین صلبیت سپر و همچنین در نظر گرفتن وزن ماشین ضخامت المان های متناظر سپر برابر ۳۵ سانتی متر انتخاب شده است. تماس مابین سپر و خاک پیرامون تونل بصورت اصطکاک موهر-کولمب با ضریب اصطکاک ۰/۲ مدل شده است. در جدول ۲ مقادیر در نظر گرفته شده برای سپر ماشین حفار بر اساس مشخصات دستگاه حفار خط ۲ قطار شهری تبریز خلاصه بندی شده است. قطر حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز ۹/۴۹ متر، قطر خارجی سپر در جلوی آن ۹/۴۶ متر و در عقب آن برابر ۹/۴۴ متر (۲ سانتی متر مخروطی) می باشد. وزن ماشین حفاری برابر ۶۲۵ تن و وزن قسمت پشتیابان ماشین حدود ۳۲۰ تن می باشد.

### ۳-۳- مدلسازی فشار سینه کار و فشار تزریق

#### دوغاب پشت سگمنت

تعیین میزان فشار مورد نیاز برای تامین پایداری سینه کار

تاثیرگذار در فرآیند حفاری مکانیزه از قبیل خاک پیرامون تونل به همراه سرباره مصنوعی، دستگاه حفار، پوشش تونل، تزریق دوغاب در فضای خالی بین پوشش و خاک و سایر پارامترهای موثر می باشد. مدل عددی ساخته شده با استفاده از نتایج حاصل از اندازه گیری های انجام گرفته در پروژه خط ۱ قطار شهری تبریز اعتبارسنجی شده و سپس مورد استفاده قرار گرفته است.

رفتار خاک با مدل الاستو پلاستیک موهر-کولمب با قانون جریان غیر مرتبط مدل شده و رفتار الاستیک برای مصالح پوشش تونل و دوغاب پشت سگمنت در نظر گرفته شده است [12][15]. خاک اطراف تونل بالای تراز آب زیرزمینی و سرباره مصنوعی بوسیله المانهای ۸ گره ای پیوسته مرتبه اول با انتگرال گیری کامل (C3D8) و پوشش تونل و سپر ماشین با المان پوسته ای S4 مدل شده است. خاک پایین تراز آب زیرزمینی و مصالح دوغاب بصورت محیط متخلخل اشباع با کاربرد المان های فشار منفذی (C3D8P) مدل شده است که در نظر گرفتن آب زیرزمینی و فشار دوغاب را امکانپذیر می سازد.

اتصال دوغاب به پوشش تونل و همچنین خاک اطراف بدون لغزش در نظر گرفته شده است. با توجه به تزریق پیوسته دوغاب پشت سگمنت ها و آب بند بودن قطعات و تامین فشار مناسب در سینه کار حفاری، نفوذ آب به درون تونل در طی فاز ساخت تونل در نظر گرفته نمی شود. به عبارت دیگر تراز آب در طی عملیات ساخت تغییر نکرده و مشخصه های ژئوتکنیکی خاک اطراف تونل ثابت فرض شده است. شرایط مرزی، نوع و تراکم المان ها بر اساس تحلیل حساسیت انتخاب شده است بطوریکه نتایج تحت تاثیر قرار نگیرد. مدلسازی بخش های مختلف عملیات اجرای تونل با دستگاه EPB-TBM در این تحقیق، به شرح زیر می باشد:

### ۳-۱- ابعاد مدل

ابعاد اولیه مدل بر اساس طرح اولیه شفت غربی انتخاب و با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت قطعی شده است. موقعیت مرزهای جانبی طوری انتخاب شده است که وجود مرزهای مصنوعی تاثیر قابل ملاحظه در میدان تنش-کرنش-فشار منفذی نداشته باشد. مش بندی مدل به میزان حداقل ۲ برابر قطر تونل پایین تر از کف تونل امتداد یافته و بطور جانبی ۷ برابر قطر تونل نسبت به مرکز تونل امتداد داده

جدول ۲- مقادیر بکار برده شده برای سیر ماشین حفار در

تحلیلهای عددی	
۰٫۲۵	ضریب پواسون
۲۱۰	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)
۶۲۵	وزن ماشین حفار (تن)
۹	طول سیر (متر)
۹٫۴۵	قطر خارجی متوسط سیر (متر)
۹٫۴۴	قطر خارجی سیر انتهایی (متر)
۹٫۴۶	قطر خارجی سیر جلویی (متر)
۹٫۴۹	قطر حفاری (متر)

$\sigma_T \geq 1.5\mu(k_a\sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + k_aq) + 1.05u$  ۲  
در رابطه فوق ضریب  $\mu$  وابسته به عمق تونل می باشد. در روش سوم تاثیر پدیده قوس خاک بالای ماشین حفار در نظر گرفته شده و نتایج حاصل بصورت ضریب فشار جانبی سه بعدی خاک ارائه شده است.

بعنوان نمونه مقادیر فشار سینه‌کار بدست آمده از روش‌های فوق به همراه مقدار فشار انتخابی برای مقطع انتهایی ناحیه تثبیت شده که ماشین حفار وارد خاک موجود منطقه می‌شود در جدول ۳ ارائه شده است. میزان فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت بطور معمول ۰٫۵ بار بیشتر از فشار سینه‌کار در نظر گرفته می‌شود. پس از تعیین فشار سینه‌کار متناظر با شرایط هر مدل در تاج تونل، فشار تزریق متناظر در تاج تونل اعمال شده و با توجه به وزن دوغاب رو به پایین افزایش می‌یابد.

جدول ۳- مقادیر و گرادیان فشار سینه‌کار بر حسب کیلو پاسکال برای مقطع انتهایی ناحیه تثبیت شده

نسبت سربار تونل به قطر تونل	۰٫۷
<i>COB</i>	۴۳
<i>Jancsecz and Steiner (1994)</i>	۳۰
<i>German Standard - DIN4085</i>	۳۱
مقدار انتخاب شده (کیلوپاسکال)	۴۰
گرادیان فشار سینه‌کار به ازای هر متر افزایش عمق	۱۲

۳-۴- مدلسازی اضافه حفاری

اضافه حفاری در ماشینهای حفار مکانیزه در اثر عوامل مختلفی ایجاد می‌شود. به منظور سادگی، مدلسازی تحت هدایت صحیح دستگاه انجام گرفته و از اضافه حفاری ناشی از انحراف دستگاه از امتداد صحیح صرف‌نظر شده است. اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سیر و سرتمه حفاری دستگاه با تعریف یک لایه نازک با رفتار الاستیک خطی مدل شده است. برای ماشین *TBM* در نظر گرفته شده در این تحقیق ضخامت این لایه برابر ۲ سانتیمتر می‌باشد. مشخصات الاستیک (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون) لایه معادل اضافه حفاری با استفاده از یک سری تحلیل حساسیت تعیین شده است. در هر یک از تحلیل‌ها همگرایی دیواره تونل حفاری شده اندازه‌گیری شده و مقادیر

تونل در زمین‌های خاکی که با دستگاه *EPB* حفاری می‌شوند یکی از مهمترین پارامترها در پیشروی دستگاه می‌باشد. این پارامتر بخصوص در مواردیکه تونل در محیط‌های شهری حفر می‌شود اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. فشار سینه‌کار بطور کلی تابعی از عمق و قطر تونل، میزان بار سطحی، تراز آب‌زیرزمینی، مشخصات مهندسی خاک و تنش موثر می‌باشد. برای تعیین فشار مناسب سینه‌کار ( $\sigma_T$ ) روش‌های مختلفی بر مبنای محاسبات تجربی، تحلیلی و عددی گسترش یافته است [16].

روش‌های تحلیلی مختلفی برای تخمین فشار مورد نیاز پایداری سینه‌کار وجود دارد [18] که در این مطالعه از سه روش تحلیلی متداول برای تخمین فشار سینه‌کار متناسب با مشخصات ژئوتکنیکی خاک منطقه شفت غربی خط ۲ قطار شهری تبریز استفاده شده است. با استفاده از روشهای پیشنهادی مرکز ساخت و ساز زیرزمینی آلمان (*COB*)، استاندارد آلمان (*DIN4085*) [5][18] و روش پیشنهادی *Jancsecz* [19] فشار سینه‌کار در تاج تونل محاسبه و با یک گرادیان متناسب با مصالح داخل محفظه حفاری دستگاه افزایش داده می‌شود.

در روش پیشنهادی *COB* مقدار فشار سینه‌کار که اندکی بیشتر از فشار جانبی حالت محرک خاک است از رابطه ۱ تعیین می‌شود:

$$\sigma_T = k_a\sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + k_aq + u \quad 1$$

که در رابطه فوق  $\sigma'_v$  تنش قائم موثر،  $c$  چسبندگی،  $q$  میزان سربار سطحی،  $u$  فشار منفذی و  $K_a$  ضریب فشار جانبی خاک می‌باشد. مطابق استاندارد آلمان میزان فشار اعمالی در سینه‌کار تونل از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

امکان سنجی استفاده از سربار مصنوعی برای کاهش عمق شفت ورودی ماشین حفار مکانیزه (مطالعه موردی شفت غربی خط ۲ قطار شهری تبریز)

در تحلیل در نظر گرفته شود برابر است با (رابطه ۳):

$$E_C = (1 - \zeta) \times E_{CLS} = 25200 \text{ MPa} \quad ۳$$

که در رابطه فوق  $E_C$  مدول یانگ ظاهری رینگ و  $E_{CLS}$  مدول الاستیسیته بتن می‌باشد که برابر ۳۶۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

به منظور در نظر گرفتن بار ناشی از پشتیبان دستگاه حفار و با فرض توزیع یکنواخت بار پشتیبان دستگاه و قرار گیری تمام بخشهای پشتیبان بر روی سگمنت کف و با در نظر گرفتن ابعاد سگمنت کف پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز، یک بار یکنواخت به میزان ۱۵ کیلوپاسکال بر ناحیه تماس سگمنت کف و پوشش تونل اعمال می‌شود. بر اساس مشخصات پروژه قطر خارجی پوشش بتنی (سگمنتها) ۹۱۸ متر و ضخامت آنها ۳۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. عرض قطعات پوشش تونل برابر ۱٫۵ متر و در نتیجه میزان گام پیشروی در هر سیکل حفاری تونل ۱٫۵ متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۵ - مشخصات مصالح بکار برده شده در مدلسازی عددی

پوشش تونل	دوغاب (سیال)	دوغاب (سخت شده)	
۲۵	۱۸	۱۸	وزن واحد ( $KN/m^3$ )
۴۰	۰	۳	مقاومت فشاری ( $Mpa$ )
۲۵۲۰۰	۵	۲۰	مدول یانگ ( $Mpa$ )
۰٫۲	۰٫۴۷	۰٫۳	ضریب پواسون

### ۳-۶- مدلسازی گروت پشت سگمنت

در مدل ساخته شده رفتار گروت پشت سگمنت الاستیک خطی در نظر گرفته شده و مشخصات وابسته به زمان مصالح گروت در نتیجه هیدراسیون با در نظر گرفتن مدول یانگ و ضریب پواسون وابسته به زمان مدل شده است. در جدول ۵ مشخصات در نظر گرفته شده برای گروت پشت سگمنتها ارائه شده است. با توجه به طرح اختلاط پیشنهاد شده برای گروت و آزمایشات انجام شده، زمان لازم برای گیرش اولیه گروت و در نتیجه حذف فشار ناشی از آن حدود ۸ ساعت برآورد شده که با توجه به میانگین سرعت پیشروی نیم رینگ در ساعت، طول فشار اعمالی در مدلسازیها برابر ۴ رینگ لحاظ شده است. بعبارت دیگر بعد از ۴ گام نصب پوشش و اعمال فشار تزریق، مشخصات گروت به حالت

بهینه مشخصات الاستیک لایه طوری انتخاب شده است تا همگرایی دیواره در تاج تونل با مقدار اضافه حفاری برابر باشد. برای حفاری تونل در خاک موجود منطقه و با نسبت سربار به قطر ۰٫۷ مشخصات الاستیک لایه معادل اضافه حفاری در جدول ۴ ارائه شده است. مشخصات این لایه همزمان با فعالسازی لایه گروت پشت سگمنت به مشخصات گروت تغییر داده می‌شود تا تمامی فضای خالی مابین سگمنت و دیواره حفاری شده از گروت پر گردد.

جدول ۴ - مقادیر مشخصات الاستیک لایه معادل اضافه حفاری

ضخامت لایه (متر)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال)
۰٫۰۲	۰٫۲	۱۰۰

### ۳-۵- مدلسازی پوشش تونل و سربار ناشی از بخش پشتیبان دستگاه

برای مدلسازی پوشش تونل از المانهای سازه‌ای با رفتار الاستیک خطی استفاده شده است. با توجه به لزوم استفاده از بتن با مقاومت بالا در ساخت سگمنت و با عنایت به پروژه های مشابه اجراء شده در دنیا و کشور بتن مورد استفاده با طبقه بندی C45/55 در نظر گرفته می‌شود که خصوصیات مقاومتی سگمنتها در جدول ۵ ارائه شده است. پوشش سگمنتی تونل در مدلسازیها بصورت همگن و یکپارچه در نظر گرفته می‌شود اما در حقیقت این پوشش از تعدادی قطعات بتنی پیش ساخته تشکیل شده است که با استفاده از مفصلهایی به یکدیگر متصل شده‌اند [20]. وجود مفصل در پوشش تونل سبب می‌شود تا از میزان سختی آن در مقایسه با یک پوشش یکپارچه کاسته شود [21]. بنابراین برای در نظر گرفتن کاهش سختی در مفصلها، یک ضریب اصلاحی انتقال ممان خمشی مناسب  $\zeta$  باید در نظر گرفته شود. این ضریب تابعی از تعداد سگمنتها و مفصلهای موجود در هر رینگ و سختی زمین اطراف پیرامون پوشش می‌باشد [5].

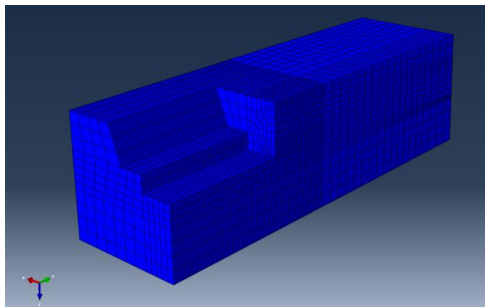
با توجه به اینکه ملاک محاسبات در روش المان محدود سختی خمشی ( $EI$ ) می‌باشد اثر وجود مفصلها بر روی مدول الاستیسیته بتن سگمنتها منعکس شده است. با در نظر گرفتن ضریب اصلاح  $\zeta=0.3$  برای مدول یانگ بتن [22] مدول یانگ واقعی که باید برای پوشش یکپارچه

طول ۳۰ رینگ (۴۵ متر) در ۸۹ گام مدلسازی می‌شود. در هر مرحله حفاری تمام سطح مقطع تونل با گام ۱٫۵ متری حفاری شده و فشار سینه‌کار به سطح حفاری شده اعمال می‌شود و همزمان با فعالسازی المان‌های لایه متناظر اضافه حفاری؛ حداکثر جابجایی شعاعی دیواره تونل برابر میزان اضافه حفاری انتخاب شده است (ناحیه c در شکل ۵ و). در گام بعدی سپر دستگاه فعال شده و شرایط مرزی معادل اضافه حفاری حذف می‌شود (ناحیه B در شکل ۵ و). در شروع عملیات تونلسازی مرحله حفاری تونل بطول پیشروی ۹ متر (برابر با طول سپر ماشین) معادل ۶ گام تکرار شده است. در ادامه و با پیشروی حفاری به اندازه یک گام، همزمان در

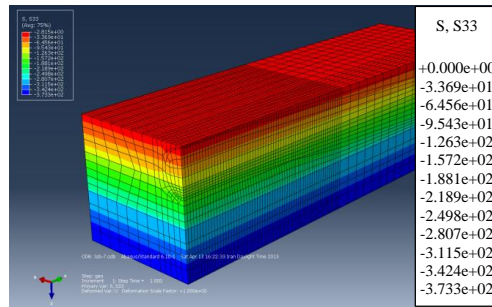
سخت شده تغییر داده شده و فشار تزریق حذف می‌شود.

### ۳-۷- مدلسازی فرآیند حفاری تونل

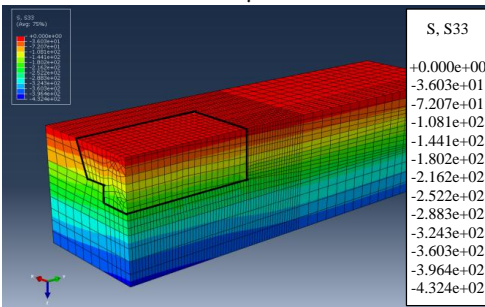
مراحل مختلف فرآیند حفاری تونل گام به گام و بصورت زیر مدلسازی شده است: در اولین گام تعادل ژئواستاتیکی مدل با در نظر گرفتن میدان تنش‌های اولیه بر اساس لایه بندی و تراز آب زیرزمینی متناظر برقرار شده است (شکل ۵ الف). در گام بعدی گودبرداری شفت بر اساس مقطع طرح اولیه تا عمق ۹ متری مدل می‌شود (شکل ۵ ب). پر کردن مقطع گودبرداری با مصالح تثبیت شده تا سطح زمین در ۳ مرحله مدلسازی شده و در ۳ گام بعدی اجرای سرباره مصنوعی بصورت مرحله‌ای مدل شده است (شکل ۵ ج-ه). پس از تکمیل هندسه شفت ورودی حفاری تونل و نصب پوشش به



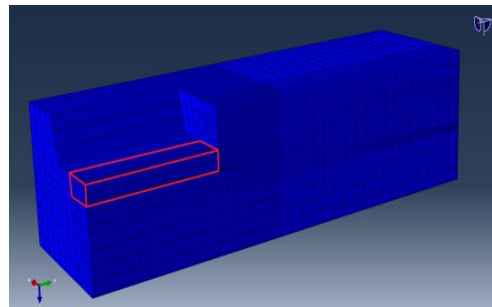
ب



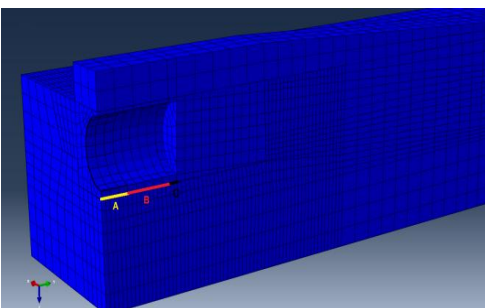
الف



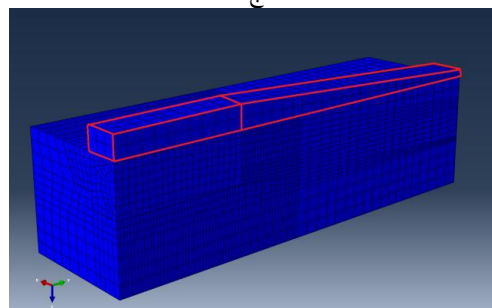
د



ج



ی



ه

شکل ۵ - مراحل مختلف مدلسازی شفت ورودی و حفاری تونل



### ۳-۸- اعتبارسنجی مدل

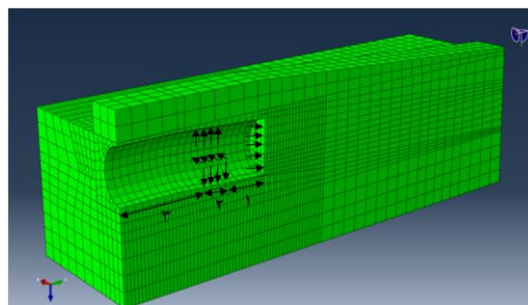
برای اعتبارسنجی فرآیند مدلسازی انجام گرفته از اندازه گیریهای میدانی انجام گرفته در پروژه خط ۱ قطار شهری تبریز به دلیل شرایط ژئوتکنیکی تقریباً مشابه با ناحیه مورد مطالعه در این تحقیق استفاده شده است. بر اساس نتایج ابزاربندی انجام گرفته مقدار نشست سطحی در بالای محور تونل خط ۱ با قطر حفاری ۶٫۸۸ متر در حالت زمین آزاد در کیلومتراژ ۰٫۶۶۰+ مسیر برابر ۴۰ میلیمتر اندازه گیری شده است. مشخصات ژئوتکنیکی مقطع مورد نظر در جدول ۶ ارائه شده است. بر اساس شرایط ژئوتکنیکی زمین اطراف تونل در ناحیه مورد مطالعه فرآیند مدلسازی با مشخصات حفاری خط ۱ انجام گرفته و مقدار نشست سطحی بدست آمده از مدلسازی در سطح زمین بالای محور تونل و ۱۰ رینگ پس از عبور ماشین حفار از مقطع مورد بررسی برابر ۳۸٫۶ میلیمتر می باشد. با توجه به نزدیکی نتایج حاصل از مدلسازی عددی و قرائت‌های محلی می توان برای شرایط ژئوتکنیکی مورد نظر با دقت مناسب از مدل رفتاری و الگوی مدلسازی انجام گرفته استفاده نمود.

جدول ۶- خصوصیات ژئومکانیکی خاک اطراف تونل در کیلومتراژ ۰٫۶۶۰ خط ۱ قطار شهری تبریز [۲۳]

طبقه بندی خاک	SP-SM	SM
عمق (متر)	۱۰-۴	۳۴-۱۰
وزن مخصوص اشباع ( $KN/m^3$ )	۲۱	۲۰
وزن مخصوص خشک ( $KN/m^3$ )	۲۰	۱۸
چسبندگی (کیلوپاسکال)	۸	۵
مدول یانگ (مگاپاسکال)	۲۳	۲۳
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۵	۳۵

### ۴- نتایج

با کاربرد نرم افزار المان محدود آباکوس و مدلسازی ۳ بعدی فرآیند تونلسازی مکانیزه، بطور موردی کاربرد سرباره مصنوعی به منظور کاهش عمق شفت ورودی ماشین حفار مکانیزه در شفت غربی خط ۲ مترو تبریز امکان سنجی شده و نتایج بدست آمده برای هر یک از پارامترهای مورد بررسی ارائه می شود. همچنین در انتها شروع موفقیت آمیز عملیات حفاری تونل خط ۲ قطار شهری تبریز گزارش شده است.

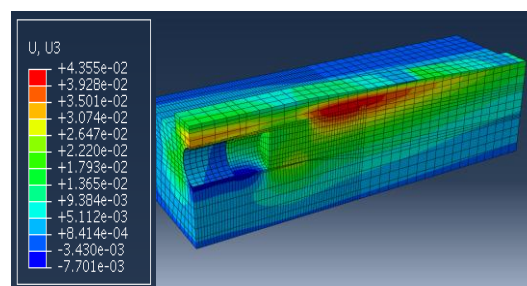


شکل ۶- مراحل مدلسازی حفاری تونل، ناحیه ۱ حفاری تونل و سپر، ناحیه ۲ نصب پوشش و اعمال فشار تزریق بطول ۴ سگمنت و ناحیه ۳ نصب پوشش و گروت سخت شده

اولین گام حفاری شده در ابتدای مدل سپر دستگاه حذف شده و همزمان با فعال کردن المانهای گروت با مشخصات گروت تازه؛ اولین پوشش بتنی نصب می شود (ناحیه A در شکل ۵ و). فشار تزریق گروت بر مرزهای حفاری تونل و سطح خارجی پوشش تونل اعمال شده و میزان فشار تزریق متناسب با وزن دوغاب به سمت پایین افزایش داده شده است. در ادامه به ازای هر مرحله حفاری در سینه تونل، یک مرحله نصب پوشش در انتهای سپری انجام شده و این عملیات بطور متوالی تکرار شده است. در مرحله بعد علاوه بر ادامه روند فوق، پس از گذشت ۴ گام نصب پوشش، عملاً گریزایی ملات گروت انجام شده و بنابراین در مدلسازی مشخصات دوغاب به گروت سخت شده تبدیل و همزمان فشار تزریق حذف می شود. بعنوان مثال در پایان گام ۱۲ حفاری، گام‌های ۱ و ۲ شامل نصب پوشش تونل همراه با گروت سخت شده بدون اعمال فشار تزریق، گام ۳ تا ۶ شامل نصب پوشش تونل همراه با دوغاب تازه و اعمال فشار تزریق و گام ۷ تا ۱۲ شامل حفاری تونل همراه با سپر دستگاه می باشد. مراحل مدلسازی با حفظ همین فواصل کاری تکرار شده و ادامه می یابد. در شکل ۶ مراحل حفاری بصورت شماتیک نشان داده شده است. بر اساس تجارب پروژه‌های مشابه و تحت شرایط اپراتوری مناسب زمان لازم برای هر مرحله حفاری ۵۴۰۰ ثانیه و زمان توقف ماشین حفار در طول نصب یک رینگ پوشش ۱۸۰۰ ثانیه در نظر گرفته می شود. حفاری تونل تحت شرایط ایده آل تحت هدایت صحیح دستگاه مدل شده و از نشست‌های ایجاد شده در نتیجه انحراف دستگاه صرف نظر شده است.

#### ۴-۱- نشست‌های سطحی

با توجه به واقع بودن شفت غربی در خارج از محیط شهری و نبود سازه‌های سطحی در مجاورت تونل، میزان نشستهای سطحی مشکل ساز نمی‌باشد. با توجه به میزان کم سربار انتخاب شده برای شروع حفاری نشست سطحی نسبتاً زیادی قابل انتظار می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل بیشترین نشست در تاج تونل و در ناحیه زیر سرباره مصنوعی برابر ۳۲ میلی‌متر ایجاد شده است. الگوی جابجایی‌های قائم کل ایجاد شده در شکل ۷ نشان داده شده است. بعد از شروع حفاری خط ۲ متروی تبریز، نشست ایجاد شده در سطح سرباره تونل ۱۹ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که تطابق خوبی با نتایج مدل‌سازی عددی (۱۷/۵ میلی‌متر) دارد.



شکل ۷- الگوی کلی جابجایی‌های قائم ایجاد شده

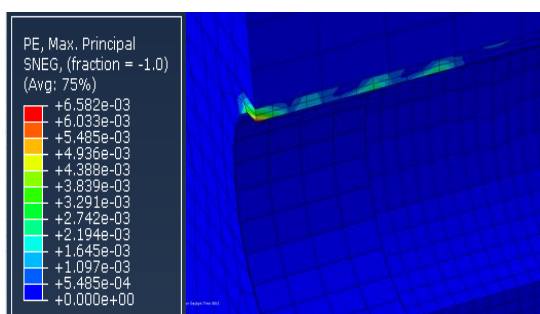
#### ۴-۲- نشست ماشین حفار

نشست ماشین حفار و همچنین نشست پوشش تونل بعنوان یکی دیگر از پارامترهای موثر در امکان‌سنجی کاربرد سرباره مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل در مرحله حفاری و بدلیل اضافه حفاری مدل شده، کف تونل دچار برآمدگی شده و در مرحله فعال‌سازی سپر ماشین حفار به دلیل وزن بالای ماشین ناحیه کف تونل نشست می‌کند. در مجموع کف تونل برابر ۵ میلی‌متر به سمت داخل تونل جابجا شده و سپر ماشین حفار از محور فرضی اولیه به میزان ۱۵ میلی‌متر دچار نشست می‌شود که این میزان نشست فرآیند حفاری را با مشکل مواجه نخواهد ساخت. همچنین میزان نشست پوشش تونل در اولین رینگ بتنی مدل شده با توجه به مشخصات دوغاب پشت سگمنت و زمان گیرش اولیه، برابر ۸/۸ میلی‌متر می‌باشد. به نظر می‌رسد به دلیل اعمال فشار تزریق هم‌زمان با نصب سگمنت و پر شدن تمامی فضای خالی موجود مابین پوشش تونل و

دیواره حفاری تونل با مصالح دوغاب که حالت ایده آل تزریق پیوسته دوغاب در حفاری مکانیزه می‌باشد؛ مقادیر نشست پوشش تونل در اندازه کم و محدوده قابل قبول می‌باشد.

#### ۴-۳- پایداری کلی سرباره مصنوعی و ناحیه تثبیت شده

با توجه به حفاری دستگاه در حالت فشار تعادلی زمین و تزریق دوغاب پشت سگمنت، ناحیه تثبیت شده اطراف تونل و سرباره مصنوعی ایجاد شده بایستی در حین حفاری تونل و اعمال فشار تزریق پایدار بوده و دچار گسیختگی نگردد. با تعیین کرنشهای پلاستیک ایجاد شده در ناحیه اطراف تونل پایداری کلی مجموعه بررسی شده است. بر اساس کانتورهای کرنش پلاستیک که در شکل ۸ نشان داده شده است در حین حفاری تونل هیچگونه گسیختگی در سرباره مصنوعی پیشنهادی ایجاد نشده و کاملاً پایدار می‌باشد. همچنین با انتخاب میزان مناسب برای فشار تعادل زمین، سینه‌کار حفاری نیز پایدار می‌باشد. صرفاً در نواحی محدود در قسمت تاج تونل تغییر شکل پلاستیک مشاهده می‌شود که علارغم این تغییر شکل ایجاد شده ناحیه اطراف تونل و سرباره مصنوعی پایدار بوده و خرابی ایجاد نشده است. بر این اساس بطور موفق می‌توان از خاک تثبیت شده و سرباره مصنوعی برای حفاری تونل استفاده کرد.



شکل ۸- کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل

در عمل با توجه به مطالعه انجام گرفته و تصمیم تیم مدیریتی پروژه از سربار با ارتفاع ۵ متر استفاده شد. با توجه به وضعیت پروژه که در زمان پیشنهاد کاربرد سربار مصنوعی بخشی از طرح اولیه اجرا شده بود؛ کف شفت ورودی ۳ متر پایین‌تر از طرح پیشنهاد شده در این مقاله اجرا شد. حفاری تونل به طور موفقیت آمیز انجام شده و سرباره اجرا شده طی

امکان سنجی استفاده از سر بار مصنوعی برای کاهش عمق شفت ورودی ماشین حفار مکانیزه (مطالعه موردی شفت غربی خط ۲ قطار شهری تبریز)

نرم افزار المان محدود آباکوس، استفاده از سر باره مصنوعی به منظور کاهش عمق شفت ورودی غربی این پروژه امکان سنجی شده است. بر اساس نتایج حاصل و با بررسی نشست های ایجاد شده در سر باره تونل، نشست و انحراف ماشین حفار و همچنین پایداری کلی مجموعه می توان با موفقیت از خاک تثبیت شده و سر بار مصنوعی استفاده کرد. با توجه به فضای کافی و مناسب موجود در پروژه مورد مطالعه، بر اساس طرح پیشنهادی و با کاهش عمق شفت ورودی علاوه بر کاهش چشمگیر مشکلات و صعوبت های اجرایی ناشی از وجود آب زیر زمینی و شرایط ژئوتکنیکی منطقه، امکان شروع عملیات حفاری با هزینه و زمان بسیار کمتر نسبت به سایر روشهای متداول میسر می باشد.

عبور ماشین حفار پایدار بوده است که در شکل ۹ تصویر عبور موفق ماشین حفار ارائه شده است.



شکل ۹ - عبور موفق ماشین حفار و سر باره اجرا شده

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به مشخصات پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز و مدلسازی ۳ بعدی و کامل فرآیند حفاری مکانیزه با کاربرد

## ۶- منابع

- [1] Fangyi, Z. (2006). *An integrated framework for tunnel shaft construction and site layout optimization*. Master thesis, University of Alberta, Edmonton.
- [2] Glenn, M. (2012). *shaft design and construction*. <http://www.Tunnel business magazine>, 5 Apr.
- [3] Sigle, O., & Stacherl, S. (2004). Design of TBM work shaft and TBM launching chamber, *tunnelling and underground space technology*, 19, 485-486. doi: 10.1016/J.tust.2004.02.127.
- [4] Tatiya, Ratan. (2005). (Tatiya, 2005). Thomas Telford; London, Reston, VA: Distributed in the USA by ASCE Press.
- [5] Maidl, B., & Herrenknecht, M., & Anheuser, L. (1996). *Mechanised shield tunnelling*. Berlin: Ernst und Sohn.
- [6] Japan Society of Civil Engineers. (1996). *Japanese Standard for Shield Tunneling*. The third edition.
- [7] Dott, I., & Mancinelli, L. (2005). evaluation of superficial settlements in low overburden tunnel TBM excavation: numerical approaches. *Geotechnical and geological engineering*, 23, 263-271.
- [8] Vervoorn, R. (2005). *Wall support for raise bored shafts*. Master thesis, Delf University of technology.
- [9] ITA working group. (2008). *conventional tunneling, report of the working group 19*, [www.ita.aites.org](http://www.ita.aites.org).
- [10] Terada, Y.; Tuji, T., (2011). *EPB Shield Tunneling for Twin Tunnels with Shallow Overburden under*

- Railway in Operation*. [http://www. Tunnel web English.stec.net](http://www.Tunnel web English.stec.net), 12 December.
- [11] Lunardi, P. (2008). *design and construction of tunnels*. © 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN978-3-540-73874-9.
- [12] Kasper, T., & Meschke, G. (2004). A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, 28, 1441-1460. doi:10.1002/nag.395.
- [13] Mroueh, H., & Shahrour, I. (2003). A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures Interaction. *Computers and Geotechnics*, 30, 245-253. doi:10.1016/S0266-352X(02)00047-2
- [14] Lambrugh, A., & Medina, L. (2012). Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanized excavations. *Computers and Geotechnics*, 40, 97-113. doi:10.1016/J.compgeo.2011.10.004.
- [15] Kasper, T., & Meschke, G. (2006). A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling. *Computers and Geotechnics*, 33, 234-247. doi:10.1016/j.compgeo.2006.04.004.
- [16] Guglielmetti, V., & Grasso, P., & Mahtab, A. (2008). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 212-215. ISBN: 978-0-415-42010-5.
- [17] Russo, G. (2003). Evaluation the required face- support pressure in EPBs advance mode. *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee* n.71-Dicembre.
- [18] Broere, W. (2001). *Tunnel face stability and new CPT applications*. PhD Thesis, Technical university of Delft.
- [19] Jancsecz, S., & Steiner, W., (1994). Face Support for a Large Mix-Shield in Heterogeneous Ground Condition. *Tunneling 94*, London, England. Springer Link.
- [20] Blom, C.B.M., 2002. Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils. PhD thesis, Delf university
- [21] Teachavorasinskun, S., Chub-uppakarn, T., 2010. Influence of segmental joints on tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 25, 490-494
- [22] Koyama, Y. (2003). Present status and technology of shield tunneling method in Japan. *Tunneling and Underground Space Technology*, 18, 145-159. PII: S0886-7798(03)00040-3.
- [۲۳] داوورپناه، سید مرتضی. (۱۳۹۰). بررسی تاثیر حفاری تمام مقطع تونلهای مترو تبریز بر روی نشست ساختمانهای مجاور. پایاننامه کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند.