

بررسی عددی تاثیر تزریق سیمان در کاهش نشست ناشی از حفاری در زمین‌های خاکی خط ۲ متروی کرج

امین اسداللهی^۱، مهدی موسوی^۲، محمدحسین خسروی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، amin.asadollahi@ut.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، mmoosavi@ut.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، mh.khosravi@ut.ac.ir

(دریافت ۱ اردیبهشت ۱۳۹۶، پذیرش ۲۱ آبان ۱۳۹۶)

چکیده

حفر تونل‌ها مانند سایر فعالیت‌های بشر بر محیط زیست تاثیرگذار است. یکی از مهم‌ترین آثار مخرب حفاری تونل، به ویژه در زمین‌های آبرفتی پدیده نشست است. این پدیده مشکلاتی را برای سازه‌های مجاور تونل ایجاد می‌کند. یکی از راه‌های موثر برای کاهش حداکثر میزان نشست ناشی از حفاری تونل‌ها در زمین‌های خاکی، انجام عملیات تزریق است. در این مطالعه به مدلسازی ایستگاه E در خط ۲ متروی کرج و نشست ناشی از حفاری آن با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پرداخته شده است. نشست ایجاد شده در سطح زمین در اثر حفاری تونل پیشاهنگ در دو حالت مدلسازی و اندازه‌گیری‌های میدانی با یکدیگر مقایسه و اعتبارسنجی مدل انجام شد. در نهایت اثر عملیات تزریق سیمانی در کاهش نشست‌های حاصل از تعریض ایستگاه و محدود کردن آن در حد مجاز مورد بررسی و اثبات قرار گرفت. همچنین بررسی‌ها نشان داد که افزایش زون تزریق اطراف ایستگاه تاثیر زیادی بر میزان نشست سطح زمین ندارد و افزایش زون تزریق تنها حدود ۱ سانتی‌متر نشست سطح زمین در این ایستگاه را کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی

زمین‌های خاکی، تزریق سیمانی، نشست سطح زمین، روش‌های عددی

۱- مقدمه

مدلسازی عددی و داده‌های نشست‌سنجی حاصل از پروژه‌های مختلف رابطه‌ها و مدل‌هایی برای بررسی تاثیر عملیات تزریق بر مشخصات خاک و کاهش نشست‌های ناشی از حفاری تونل پرداخته شد که نتایج قابل قبولی بدست آمد [۷] و [۸] و [۹] و [۱۰]. از این‌رو در این مطالعه به بررسی عملیات تزریق در ایستگاه E پروژه خط ۲ متروی کرج با کمک مدلسازی عددی با نرم‌افزار FLAC3D پرداخته شد.

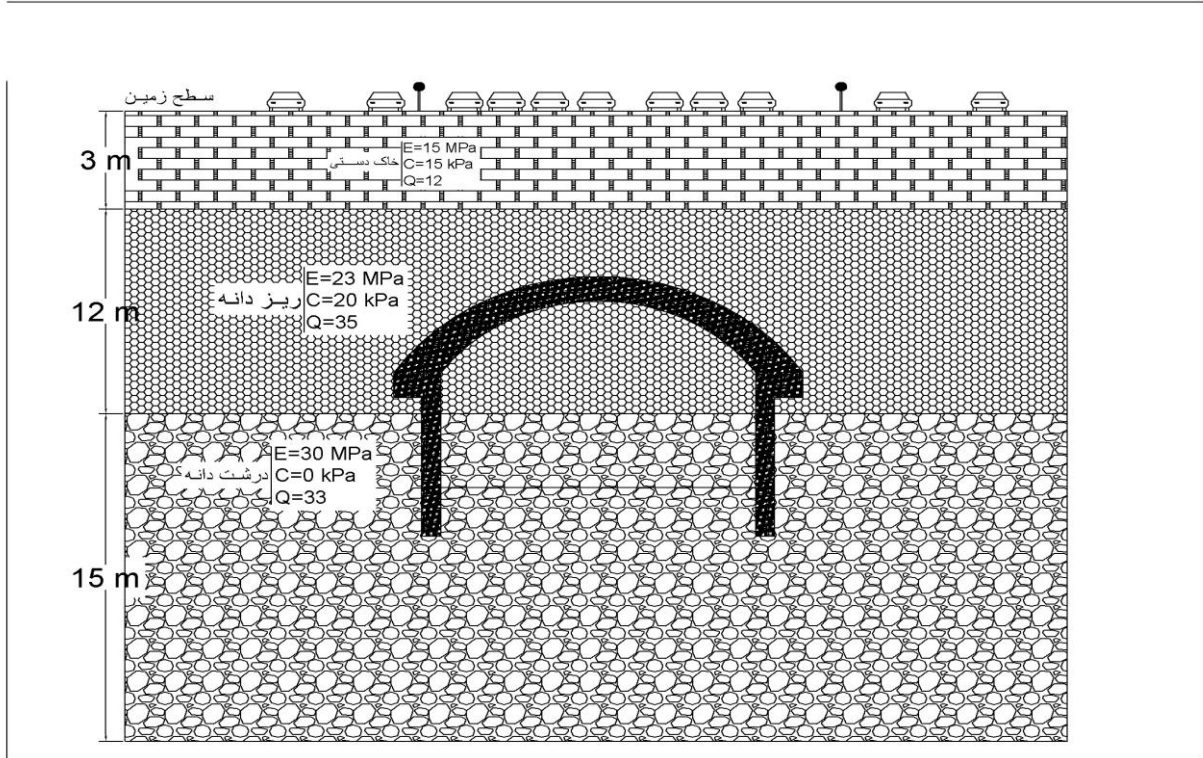
۲- مشخصات پروژه

خط ۲ متروی کرج از محدوده کمال‌شهر در غرب شروع می‌شود و در امتداد خیابان شهید بهشتی ادامه داشته و پس از بلوار طالقانی و ایستگاه کرج به سمت ملارد ادامه می‌یابد. ایستگاه E یکی از ایستگاه‌های این پروژه در تقاطع خیابان شهید بهشتی و خیابان قلم قرار گرفته است. این منطقه تراکم جمعیت بالایی دارد و از محلات قدیمی شهر کرج به شمار می‌آید. از لحاظ ژئوتکنیکی ساختگاه این ایستگاه از خاک‌های ماسه‌ای لای‌دار که ضریب مقاومت و چسبندگی ناچیزی دارند تشکیل شده است. مقطع این ایستگاه به شکل نعل اسبی است و عرض و ارتفاع آن به ترتیب برابر با ۱۶/۷۲ و ۱۱/۴ متر و در عمق متوسط ۱۵ متری حفاری شده است [۱۱].

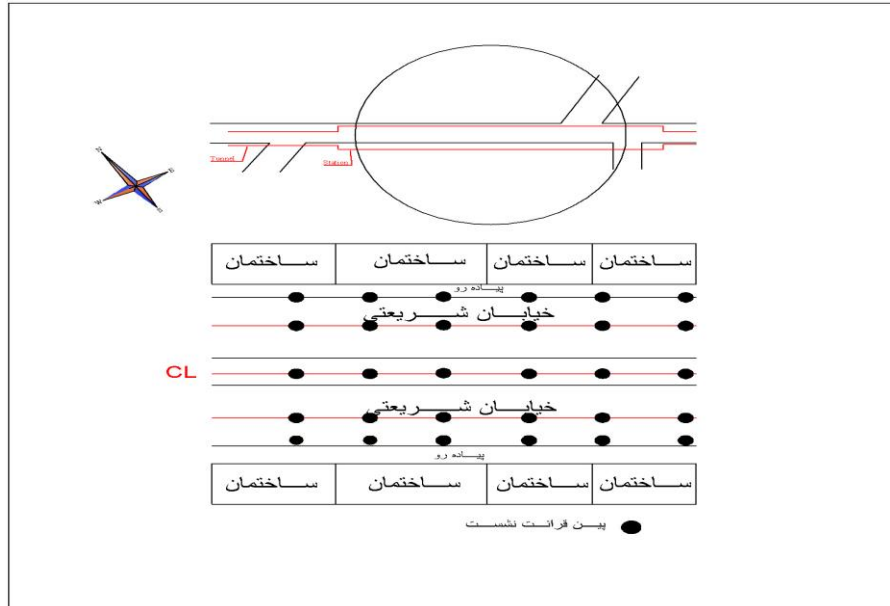
در ایستگاه E که بین کیلومتر ۳+۳۲۰ تا ۳+۴۸۰ واقع شده است، در قسمت فوقانی از سطح زمین تا عمق حدود ۳ متری، لایه خاک دستی و در زیر آن لایه ریز دانه L1 از عمق حدود ۳ متری تا عمق ۱۵ قرار دارد و در زیر آن نیز از عمق حدود ۱۵ به بعد نیز لایه درشت دانه L2-۲ واقع شده است [۱۱]. شکل ۱ شمایی کلی از مصالح در طول مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز مشخصات لایه‌های خاک موجود در محل ایستگاه را نشان می‌دهد [۱۱].

به منظور تعیین میزان نشست طی انجام مراحل مختلف پروژه، ایستگاه‌های نشست‌سنجی مطابق شکل ۲ در کیلومترهای مختلف در طول ایستگاه E نصب شد.

حفار تونل در اعماق کم و در زمین‌های خاکی منجر به ایجاد جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل‌هایی در اطراف تونل می‌شود. اگر تونل کم عمق باشد، این جابه‌جایی‌ها می‌توانند به سطح زمین برسند و موجب آسیب رساندن به سازه‌های موجود در سطح زمین شوند، بنابراین تخمین میزان نشست زمین در اثر حفار تونل در زمین‌های خاکی و کم عمق و همچنین ارایه راه‌کارهایی مناسب برای کنترل و کاهش این جابه‌جایی‌ها مهم است. یکی از راه‌کارهای مناسب برای کاهش نشست‌های ایجاد شده در اثر حفاری تونل در زمین‌های خاکی استفاده از عملیات تزریق است [۱]. عملیات تزریق امروزه در بسیاری از پروژه‌های عمرانی به ویژه پروژه‌های زیرزمینی و در محیط‌های خاکی استفاده می‌شود تا ضمن کاهش مقدار نشست و تحکیم مصالح، اندرکنش زمین و سازه نیز بهبود یابد. تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی موثر بودن عملیات تزریق بر کاهش نشست ناشی از حفاری‌های زیرزمینی و استفاده از روش‌های عددی در این زمینه انجام شده است. امانی‌پور و همکاران (۱۳۹۱) تاثیر تزریق بر بهبود خواص مقاومتی رسوبات آبرفتی اطراف تونل‌ها را مورد بررسی قرار دادند [۲]. وانگ و همکارانش (۲۰۱۴) به بررسی پیش‌بینی خصوصیات خاک-سیمان و کاربرد مطالعات عددی در نشست ناشی از حفاری تونل پرداختند [۳]. گیمپل و همکاران (۲۰۰۸) به مدلسازی سه‌بعدی در جابه‌جایی‌های ناشی از عملیات تزریق در تونل‌سازی پرداختند [۴]. مطالعه دیگری با عنوان نقش عملیات تزریق در کاهش نشست حاصل از حفار تونل‌های بزرگ توسط عطائی و همکاران (۱۳۸۵) انجام شد [۵]. لی و همکاران (۲۰۰۹) با توجه به داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی که روی خاک‌های مختلف انجام دادند به این نتیجه رسیدند که بعد از عملیات تزریق سیمانی مقدار چسبندگی خاک به طور متوسط بین ۳۵۰ تا ۵۵۰ کیلوپاسکال و مقدار زاویه اصطکاک خاک بین ۳۲ تا ۳۸ درجه تغییر می‌کند [۶]. در همین راستا مطالعات بسیاری روی ویژگی‌های مکانیکی خاک بعد از عملیات تزریق و مدلسازی عددی این عملیات توسط یودین و همکاران (۱۹۹۷)، تانگ و همکاران (۲۰۰۰)، لورنز و همکاران (۲۰۰۶)، لی و همکاران (۲۰۰۵) و لیانگ (۲۰۰۹) انجام شد. در همه این بررسی‌ها به کمک



شکل ۱- پروفیل زمین‌شناسی و مشخصات خاک ایستگاه E [۱۱]



شکل ۲- نمایی شماتیک از محل قرارگیری ایستگاه و پین‌های قرانست نشست در سطح زمین

جدول ۱- مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک ایستگاه E [۱۵]

مدول الاستیسیته E (MPa)	ضریب پواسون (ν)	چگالی γ (kN/m ³)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی C (kPa)	نوع خاک	لایه خاک
۱۵	۰٫۲۷	۱۸٫۶	۱۲	۱۵	SM	خاک دستی
۲۳	۰٫۲۹	۲۰	۳۵	۲۰	SP-SM	خاک ریزدانه
۳۰	۰٫۲۹	۲۲	۳۳	۰	GP-GM	خاک درشت دانه

می‌شود. فشار تزریق ۳ بار در نظر گرفته شده است. چنانچه پس از تزریق دو میکس از دوغاب مورد اشاره فشار به ۵۰ درصد فشار نهایی نرسد عملیات تزریق متوقف می‌شود. ادامه عملیات تزریق بعد از دو ساعت گیرش شروع می‌شود. چنانچه فشار گمانه به ۵۰ درصد فشار نهایی رسیده باشد، عملیات تزریق باید تا رسیدن به فشار نهایی ادامه یابد [۱۵].

۵- توصیف مدل عددی

برای ساخت هندسه مدل در این پروژه از نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است که یک نرم‌افزار تفاضل محدود عددی است و در محیط‌های پیوسته به کار می‌رود. با توجه به متقارن بودن ایستگاه، فقط نیمی از آن مدل شده است.

ابعاد مدل با توجه به شعاع ناحیه تاثیر در راستای محور x ۱۰ برابر شعاع ایستگاه انتخاب شد تا از تاثیر مرزهای کناری بر روی مدل کاسته شود و همچنین بتوان محدوده پلاستیک را مشاهده کرد. عرض مدل با توجه به شعاع ۸٫۵ متری ایستگاه ۸۵ متر در نظر گرفته شده است. طول مدل نیز که شامل طول ایستگاه و بخشی از تونل‌های مجاور آن است، ۲۰۰ متر انتخاب شد تا کل ایستگاه و تاثیر تونل‌های مجاور آن را بر روی نشست نشان دهد. ارتفاع مدل نیز ۵۷ متر برای نشان دادن روبره و کف تونل انتخاب شده است. ضخامت لایه زیر تونل بر نحوه توزیع تنش در اطراف تونل تاثیرگذار است که مناسب‌ترین ضخامت برای این لایه $D/5$ در نظر گرفته شده است [۱۲]. برای ساخت هندسه با توجه به ابعاد بزرگ ایستگاه به صورت چند تکه ساخته شد. در ساخت هندسه تاق بتنی و سطح حفاری در برنامه FLAC3D، از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شد و سپس با استفاده از دستور TABLE به نرم‌افزار FLAC منتقل شد. با وجود زمان‌بر بودن انتقال شکل هندسی از این روش، برای افزایش دقت مدل این کار انجام گرفته شد. برای

۳- روش ساخت ایستگاه E

روش‌های ساخت ایستگاه‌های پذیرش مسافر با توجه به محل قرارگیری آن‌ها در بافت شهری اهمیت زیادی دارد و بر حسب موقعیت آن نسبت به عوارض شهری، روش‌های مختلفی برای اجرا مطرح می‌شود. بر اساس نیمرخ مسیر مترو و از نظر طبقه‌بندی کلی، ایستگاه‌ها به دو دسته روزمینی و زیرزمینی تقسیم می‌شوند. اصولاً عمق ایستگاه تابع مسیر تونل است و در هر موقعیت، ایستگاه بر اساس تراز ریل تونل، انتخاب و طراحی می‌شود. برای حفاری ایستگاه E از روش سیستم پیش نگهدارنده تاق بتنی استفاده شده است. در این سیستم پیش از حفر فضا، با ساخت یک سازه موقت بتن مسلح، پایداری موقت تونل تامین می‌شود. مزایای این روش عبارتند از [۱۱]:

- ایجاد پدیده قوسی در اطراف بازشدگی و استفاده از ظرفیت باربری خاک
- کاهش تغییر شکل اطراف بازشدگی و پیشگیری از دست‌خوردگی اطراف تونل
- کاهش جابه‌جایی اولیه خاک در حین حفاری

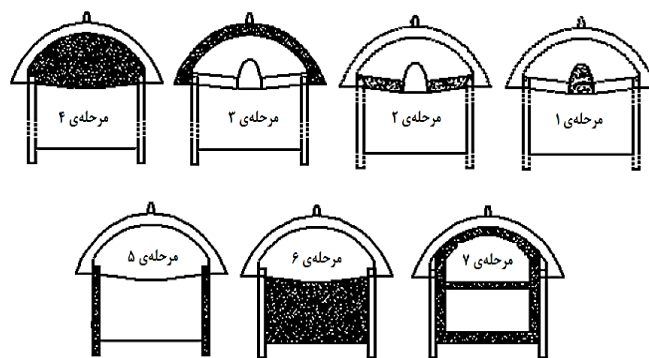
شکل ۳ مراحل اجرای ایستگاه با استفاده از تاق بتنی را نشان می‌دهد.

۴- انجام عملیات تزریق

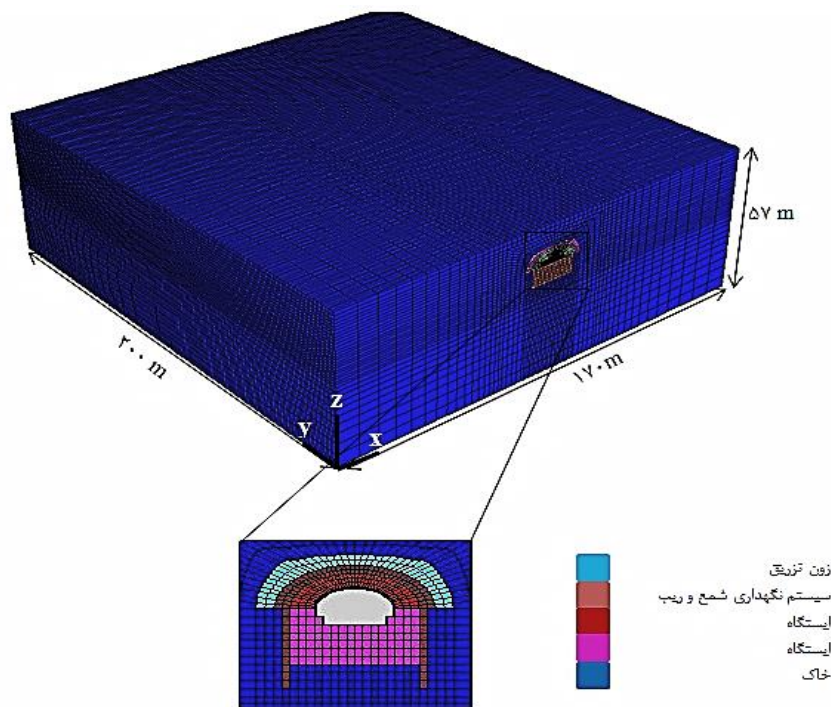
بعد از اتمام عملیات حفاری گمانه و نصب لوله مشبک و پر کردن حد فاصل بین جدار گمانه و لوله مشبک با مخلوط سیمان و سیلیکات، عملیات تزریق با نصب مسدودکننده و بستن اتصالات مورد نیاز آغاز می‌شود. به این ترتیب ابتدا ۲۰۰ لیتر آب به داخل میکسر ریخته شده و دوغابی با نسبت آب به سیمان ۱ و ۱٫۵ ساخته می‌شود و دوغاب به داخل گمانه تزریق

وسایل نقلیه عبوری در خیابان بالای ایستگاه (خیابان بهشتی) را شبیه‌سازی می‌کند [۱۳]. سطح آب زیرزمینی با توجه به گزارش‌های داده شده پایین‌تر از تراز ایستگاه قرار دارد [۱۴]. مدل رفتاری خاک دستی و خاک اصلی ساختگاه، مطابق معیار موهر-کولمب و اجزای سامانه نگهداری، الاستیک در نظر گرفته شده است. خصوصیات شاکریت و بتن استفاده شده برای ساخت المان‌های پوشش بتنی نیز در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۲ ماکزیمم نشست اتفاق افتاده در هر مقطع پس از تکمیل حفاری مراحل اول و دوم ساخت ایستگاه و ثابت شدن نشست‌ها ارائه شده است.

مدلسازی شمع‌ها از المان ساختاری شمع (PILE) در نرم‌افزار استفاده شده است. به علت کاهش زمان اجرای مدل، ابعاد مش‌ها در نزدیکی ایستگاه ریزتر و با فاصله گرفتن از ایستگاه ابعاد مش‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۴ هندسه مدل ساخته شده و نحوه مش‌بندی در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. بارهای اعمال شده بر مدل شامل دو بار گسترده A و B است. بار گسترده A که شامل تاثیر وزن ساختمان‌ها با مساحت مقطع پی ۱۵×۱۵ متر است معادل ۱۰ کیلونیوتن برای هر طبقه (معرف وزن طبقات) در نظر گرفته شده است. بار گسترده B که ۵/۳ kN/m² در نظر گرفته شده است، بار ترافیک



شکل ۳- مراحل اجرای ایستگاه با استفاده از روش تاق بتنی [۱۱]



شکل ۴- هندسه مدل ساخته شده و نحوه مش‌بندی انجام شده در نرم‌افزار FLAC3D

جدول ۲- خصوصیات پوشش سازه نگهبان ایستگاه E [۱۵]

پارامتر	شمع ها و ریبها	لاینینگ اصلی	شاتکریت
چگالی (γ (kN/m ³))	۲۵	۲۵	۲۴٫۵۲
مدول الاستیسیته E (GPa)	۲۳٫۸۸	۲۳٫۸۸	۱۰٫۵
ضریب پواسون ν	۰٫۲۵	۰٫۲۵	۰٫۲۵

جدول ۳- میزان نشست حداکثر در مقاطع مختلف بعد از تکمیل حفاری مرحله‌های اول و دوم

ردیف	کیلومتراژ	فاصله از ابتدای ایستگاه E (سرم‌سازی) (m)	حداکثر نشست (cm)
۱	۳+۳۵۰	۳۰	۳٫۸
۲	۳+۳۸۵	۶۵	۴٫۶
۳	۳+۴۰۰	۸۰	۹٫۴
۴	۳+۴۲۵	۱۰۵	۶٫۵
۵	۳+۴۴۰	۱۲۰	۴٫۲
۶	۳+۴۶۰	۱۴۰	۳٫۹

۶- کالیبره کردن مدل

به منظور کالیبره کردن مدل‌سازی عددی، نقاط تاریخچه- ای هم‌ارز با نقاط نصب پین‌های نشست‌سنجی در واقعیت، برای مدل تعریف شد و نشست اندازه‌گیری شده در این نقاط بعد از تکمیل مرحله اول و دوم ساخت ایستگاه، با نتایج ابزار دقیق نصب شده در سطح زمین مقایسه شد که انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل‌سازی و ابزار دقیق مشاهده می‌شود. شکل ۵ نیز نشست‌های قرائت شده روی محور ایستگاه در راستای طولی بعد از تکمیل مرحله اول و دوم را برای دو حالت مدل‌سازی و نتایج ابزار دقیق نشان می‌دهد.

۷- روند مدل‌سازی عملیات تزریق

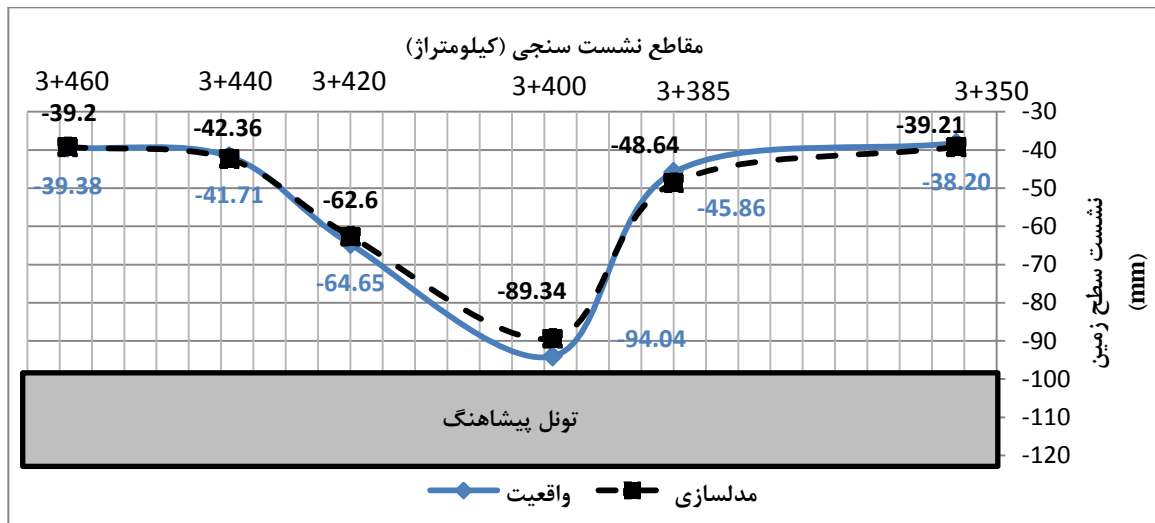
تعریض ایستگاه بر این قرار است که ابتدا نیمه بالایی ایستگاه با گام حفاری ۲ متری حفاری و نگهداری می‌شود، سپس نیمه پایینی حفاری و سپس سیستم نگهداری بتنی نهایی قالب‌بندی و بتن‌ریزی می‌شود [۱۱]. اما با توجه به اینکه نشست‌ها در اثر تکمیل مراحل اول و دوم در محدوده ایستگاه غالباً به حد بحرانی نزدیک و سبب خساراتی به ساختمان‌های مجاور واقع در سطح زمین شده است، برای جلوگیری از افزایش جابه‌جایی‌ها و وارد آمدن آسیب‌های جدی به ساختمان‌ها و سازه‌های مجاور ایستگاه، علاوه بر تمهیدات ویژه‌ای که در ادامه ساخت این ایستگاه در نظر گرفته شده است، تصمیم بر آن شد که قبل از تعریض ایستگاه، عملیات تزریق به منظور بهبود

شرایط خاک اجرا شود. برای این منظور الگوی حفاری و تزریق پیشنهاد شده توسط مشاور طرح به صورت شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شد. در این هندسه گمانه‌ها به صورتی در نظر گرفته شده که برخوردی با ریب‌ها نداشته باشند. آرایش گمانه‌ها در پلان به صورت خطی و با فاصله‌داری ۱٫۵ متر در نظر گرفته شده است. طول گمانه‌ها با فرض عمق قرارگیری تاسیسات شهری (۵ متر)، تا ارتفاع حداقل ۱٫۵ برابر هندسه ایستگاه در نظر گرفته شده است. طول گمانه بسته به محل قرارگیری تغییر کرده و به همراه دیگر مشخصات هندسی گمانه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است [۱۵].

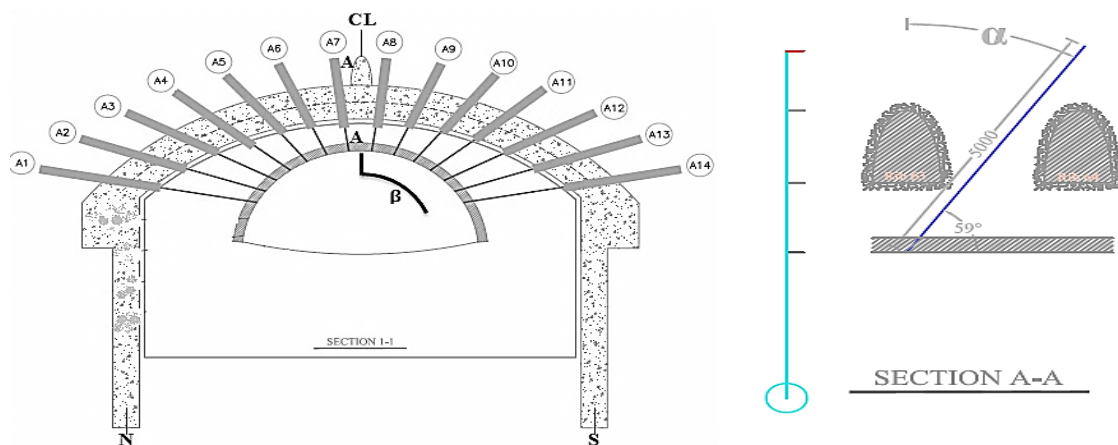
به منظور انجام عملیات تزریق برای شبیه‌سازی لایه تزریق شده، از افزایش پارامترهای خاک مانند افزایش مدول یانگ، چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک در محدوده لایه مورد نظر استفاده شده است. به منظور مدل کردن فشار تزریق، فشار ناشی از تزریق تا رسیدن به مقدار فشار نهایی به صورت پله‌ای و مرحله به مرحله به مدل اعمال می‌شود [۴].

بعد از انجام عملیات تزریق در پلان ۴۰ متری ایستگاه، نمونه‌هایی به صورت تصادفی از زون تزریق شده گرفته شد و آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک تزریقی تهیه شده انجام گرفته است [۱۴]. هدف از این تست‌ها بدست آوردن مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک بعد از عملیات تزریق در خاک محل پروژه است. نتایج حاصل از آزمایش برش و آزمایش تک‌محوره در جدول ۴ آمده است.

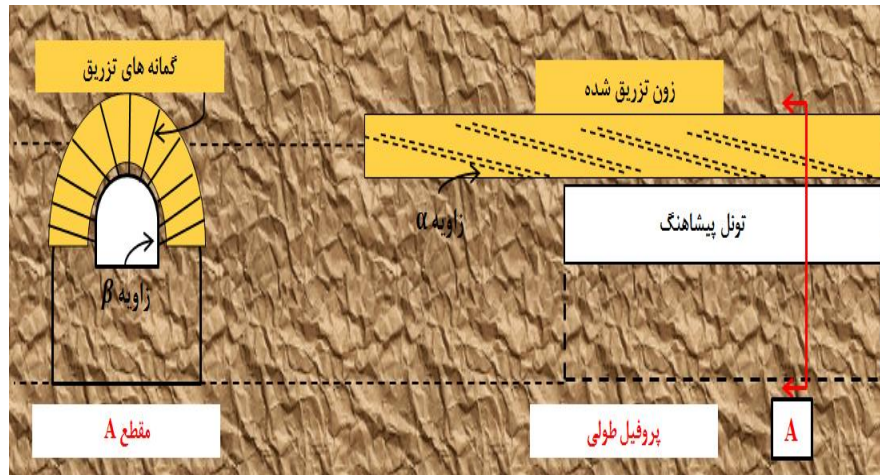
شکل ۸ نمایی از زون تزریق مدلسازی شده که در آن قرار است عملیات تزریق انجام شود، نشان داده شده است. در مدلسازی فرآیند تزریق در زون بالای ایستگاه انتظار می‌رود که طبق مشاهدات انجام شده در پروژه عملیات تزریق در ایستگاه، بعد از عملیات تزریق، سطح زمین در اثر فشار تزریقی که به لایه‌های خاک اعمال می‌شود، اندکی بالازدگی داشته باشد. شکل ۹، بالازدگی سطح زمین در اثر مدلسازی تزریق در نقطه‌ای واقع بر مرکز تونل در مقطع ۳+۴۰۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود پس از انجام عملیات تزریق در سطح زمین مقداری بالازدگی اتفاق می‌افتد و میزان نشست در مقطع ۳+۴۰۰ از مقدار ۸۹٫۳ میلی‌متر به ۸۸٫۴ میلی‌متر می‌رسد (حدود ۰٫۸۳ میلی‌متر بالازدگی رخ می‌دهد).



شکل ۵- نشست‌های قرائت شده روی محور ایستگاه در راستای طولی بعد از تکمیل مرحله اول و دوم



شکل ۶- مشخصات هندسی گمانه‌ها و طول تزریق شده گمانه‌ها [۱۵]



شکل ۷- نمایی شماتیک از زون تزریق مجاور تونل

جدول ۴- مشخصات گمانه ها [۱۵]

زاویه [β(deg)]	زاویه [α(deg)]	نصب پکر (m)	طول (m)	قطر (mm)	کد گمانه
۸	۵۹	۱٫۷	۵	۷۶	A7
۲۴	۶۱	۱٫۸	۵٫۵	۷۶	A6
۳۹	۶۵	۲	۶	۷۶	A5
۵۱	۶۹	۲٫۵	۶٫۵	۷۶	A4
۶۲	۷۳	۳	۷	۷۶	A3
۷۲	۷۶	۳٫۵	۸	۷۶	A2
۸۰	۷۸	۴٫۲	۹	۷۶	A1

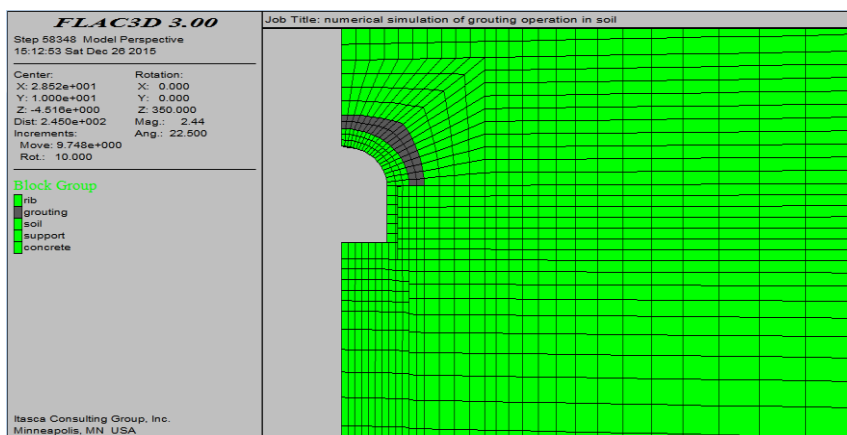
جدول ۵- پارامترهای ژئومکانیکی خاک قبل و بعد از تزریق [۱۶]

خواص خاک	E (MPa)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (درجه)
قبل از تزریق	۲۵	۲۰	۱۷	۳۵
بعد از تزریق	۱۴۰۰	۲۶	۱۳۰	۵۸

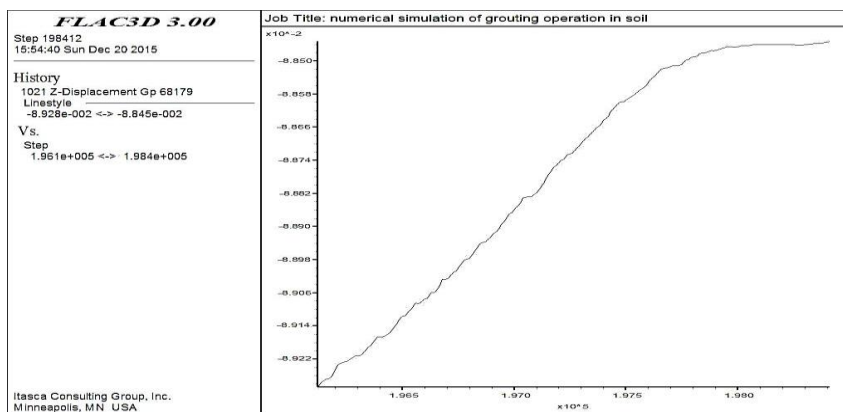
۸- مقایسه نتایج تعریض ایستگاه

شکل ۱۰ مقایسه بین نشست سطح زمین، قبل و بعد از تعریض ایستگاه را در دو حالت تزریق شده و تزریق نشده نشان می-دهد.

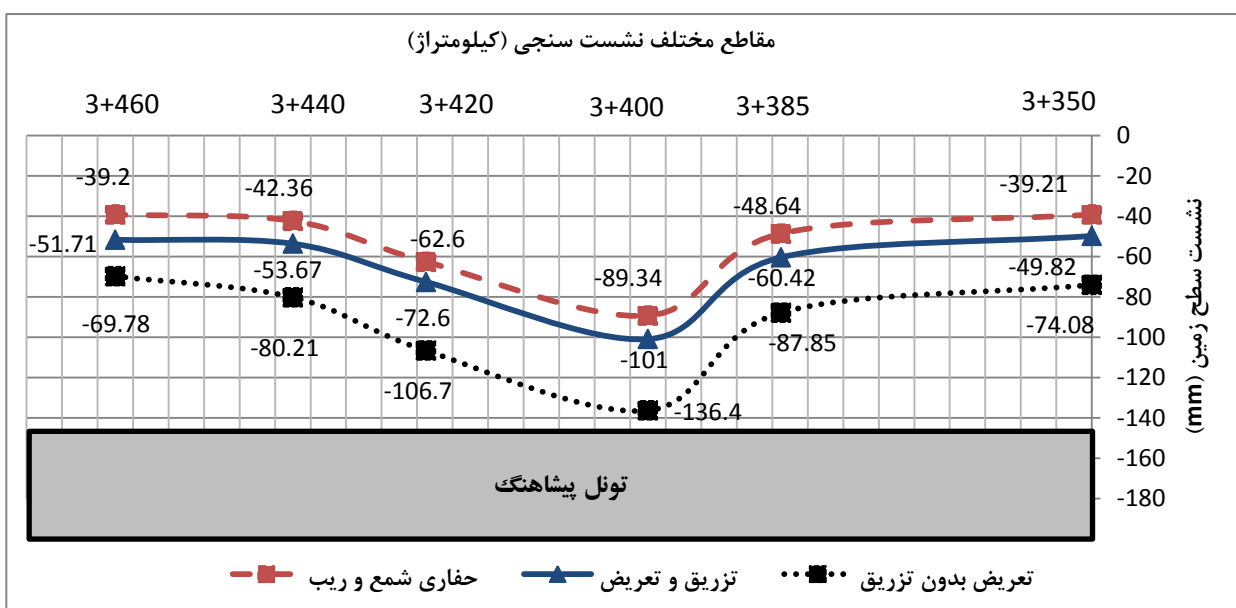
شکل های ۱۱ و ۱۲ نتایج حاصل از مدلسازی تعریض ایستگاه در دو حالت تزریق شده و تزریق نشده است که مقایسه ای بین کنتورهای جابه جایی در راستای Z در دو حالت یاد شده است.



شکل ۸- نمایی از منطقه تزریق در مدل سازی



شکل ۹- بالازدگی سطح زمین در اثر تزریق در مقطع ۳+۴۰۰



شکل ۱۰- مقایسه منحنی نشست طولی قبل و بعد از تعریض در دو حالت تزریق شده و تزریق نشده

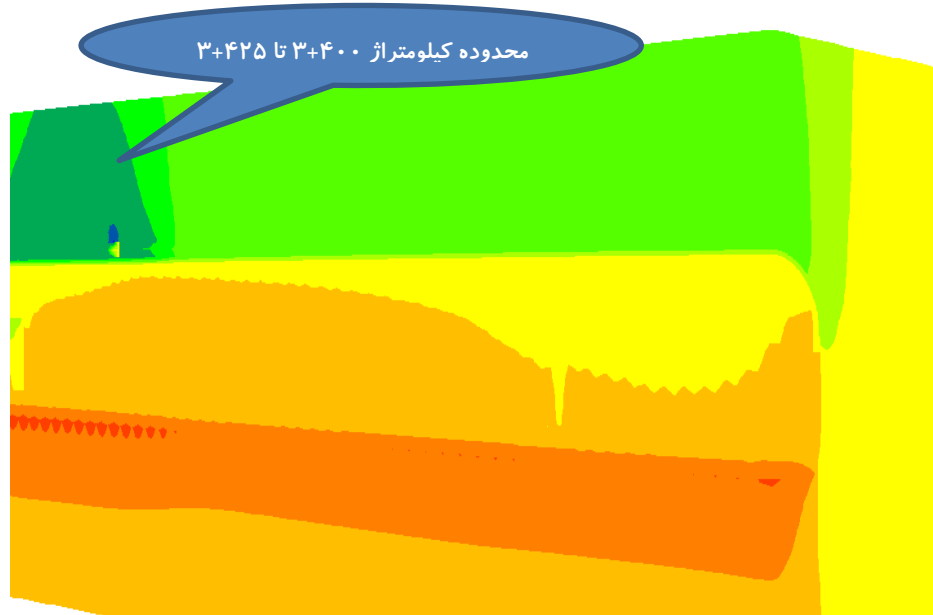
FLAC3D 3.00

Step 395536 Model Perspective
15:30:28 Thu Sep 14 2017

Center:	Rotation:
X: 2.100e+001	X: 0.000
Y: 8.000e+001	Y: 0.000
Z: -2.500e+000	Z: 0.000
Dist: 1.961e+002	Mag.: 1.56
Increments:	Ang.: 22.500
Move: 7.803e+000	
Rot.: 10.000	

Contour of Z-Displacement

Magfac = 0.000e+000
 -1.5486e-001 to -1.5000e-001
 -1.5000e-001 to -1.2500e-001
 -1.2500e-001 to -1.0000e-001
 -1.0000e-001 to -7.5000e-002
 -7.5000e-002 to -5.0000e-002
 -5.0000e-002 to -2.5000e-002
 -2.5000e-002 to 0.0000e+000
 0.0000e+000 to 2.5000e-002
 2.5000e-002 to 5.0000e-002
 5.0000e-002 to 5.8771e-002
 Interval = 2.5e-002



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

(الف)

FLAC3D 3.00

Step 395536 Model Perspective
15:30:28 Thu Sep 14 2017

Center:	Rotation:
X: 2.100e+001	X: 0.000
Y: 8.000e+001	Y: 0.000
Z: -2.500e+000	Z: 0.000
Dist: 1.961e+002	Mag.: 1.56
Increments:	Ang.: 22.500
Move: 7.803e+000	
Rot.: 10.000	

Contour of Z-Displacement

Magfac = 0.000e+000
 -1.5486e-001 to -1.5000e-001
 -1.5000e-001 to -1.2500e-001
 -1.2500e-001 to -1.0000e-001
 -1.0000e-001 to -7.5000e-002
 -7.5000e-002 to -5.0000e-002
 -5.0000e-002 to -2.5000e-002
 -2.5000e-002 to 0.0000e+000
 0.0000e+000 to 2.5000e-002
 2.5000e-002 to 5.0000e-002
 5.0000e-002 to 5.8771e-002
 Interval = 2.5e-002



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

(ب)

شکل ۱۱- کانتورهای نشست در حالت تزریق شده در راستای الف) طولی ب) عرضی

FLAC3D 3.00

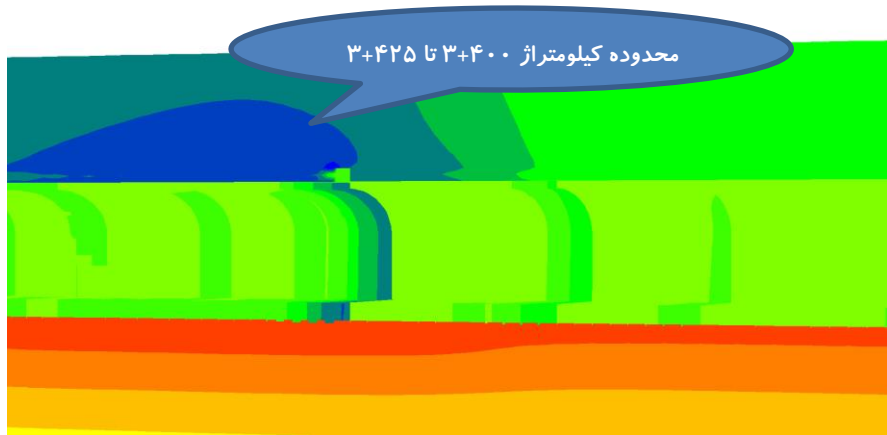
Step 288927 Model Perspective
08:31:32 Mon Sep 11 2017

Center: X: -8.913e+000 Y: 7.739e+001 Z: 2.507e+000
Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 350.000
Dist: 1.967e+002 Mag.: 1.56
Ang.: 22.500

Contour of Z-Displacement

Magfac = 1.000e+000
-1.9408e-001 to -1.7500e-001
-1.7500e-001 to -1.5000e-001
-1.5000e-001 to -1.2500e-001
-1.2500e-001 to -1.0000e-001
-1.0000e-001 to -7.5000e-002
-7.5000e-002 to -5.0000e-002
-5.0000e-002 to -2.5000e-002
-2.5000e-002 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 2.5000e-002
2.5000e-002 to 5.0000e-002
5.0000e-002 to 7.5000e-002
7.5000e-002 to 9.9136e-002
Interval = 2.5e-002

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA



(الف)

FLAC3D 3.00

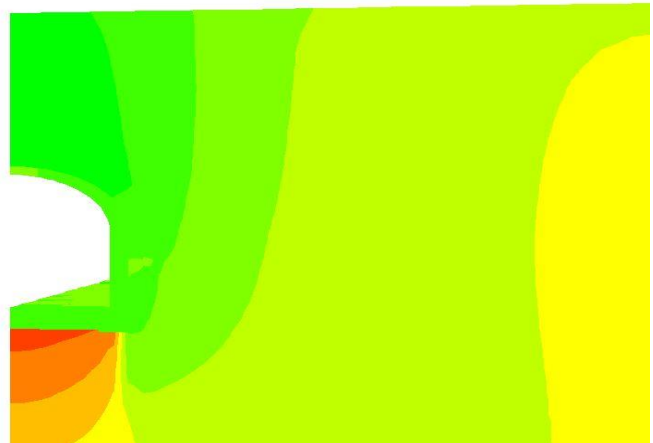
Step 288927 Model Perspective
19:58:59 Mon Sep 11 2017

Center: X: -4.419e+000 Y: 7.719e+001 Z: 3.854e+000
Rotation: X: 360.000 Y: 0.000 Z: 350.000
Dist: 1.967e+002 Mag.: 1.25
Increments: Move: 7.824e+000 Rot.: 10.000

Contour of Z-Displacement

Magfac = 1.000e+000
-1.9408e-001 to -1.7500e-001
-1.7500e-001 to -1.5000e-001
-1.5000e-001 to -1.2500e-001
-1.2500e-001 to -1.0000e-001
-1.0000e-001 to -7.5000e-002
-7.5000e-002 to -5.0000e-002
-5.0000e-002 to -2.5000e-002
-2.5000e-002 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 2.5000e-002
2.5000e-002 to 5.0000e-002
5.0000e-002 to 7.5000e-002
7.5000e-002 to 9.9136e-002
Interval = 2.5e-002

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA



(ب)

شکل ۱۲- کانتورهای نشست در حالت تزریق نشده در راستای الف) طولی ب) عرضی

شده میزان نشست بین ۲۰ تا ۳۵ درصد (۲/۵ تا ۳/۵ سانتی‌متر) نسبت به حالت بدون تزریق کاهش می‌یابد. این مقدار اختلاف نشست نسبت به دو حالت تزریق شده و تزریق نشده برای کیلومترهای ۳+۴۰۰ تا ۳+۴۲۵ برابر با ۳/۵۴ سانتی‌متر است که نشان می‌دهد این روش به تنهایی نمی‌تواند مناسب باشد و پیشنهاد می‌شود که یا با افزایش زون تزریق اطراف ایستگاه (علاوه بر سقف، تزریق در دیواره‌ها و کف تونل هم انجام شود) و یا با سایر روش‌های بهسازی مانند فورپولینگ میزان نشست سطح زمین را تا رسیدن به مقدار مجاز کاهش داد.

عواملی مانند درصد سیمان، مدت زمان گیرش و افزایش زون تزریق اطراف ایستگاه می‌تواند در بهبود مشخصات خاک و در نتیجه کاهش نشست سطح زمین نقش بسیار موثر و کنترل‌کننده‌ای داشته باشند.

۱۰- مراجع

[۱]. وفاپیان، م.، جعفرپیشه، ش. (۱۳۸۲). "بررسی ویژگی‌های نشست‌های زمانی خاک در اثر حفر تونل‌های کم عمق". ششمین کنفرانس تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت. تهران.

[۲]. امانی‌پور، ه.، خرقانی، س. (۱۳۹۱). "اثر تزریق بر بهبود خواص مقاومتی رسوبات آبرفتی اطراف تونل‌ها". دومین همایش ملی عمران و توسعه پایدار. مشهد.

[3]. Wang, D., & Olowokere, D. (2014). "Interpretation of soil-cement properties and application in numerical studies of ground settlement due to tunneling under existing metro line". Geotech Geol Eng 32, 1275-1289.

[4]. Gimpel, M., Schuller, E., & Pittino, G. (2008). "Numerical 3D modeling of displacement grouting in tunneling". BHM 153, 75-77.

[۵]. عطایی، م.، فردوسی، ب.، میکائیل، ر. (۱۳۸۵). "نقش عملیات تزریق در کاهش نشست حاصل از حفر تونل‌های بزرگ". ششمین همایش ایمنی، بهداشت و محیط زیست در معادن و صنایع معدنی.

[6]. Li, J., & Liang, R. (2009). "Research on

شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نمودار نشست عرضی و طولی، سطح زمین بر روی محور تونل پس از تکمیل مراحل مختلف (حفاری، نگهداری و نظایر آن) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است میزان جابه‌جایی در ایستگاه‌های مختلف نشست-سنجی بعد از اعمال عملیات تزریق کاهش می‌یابد اما این کاهش نشست برای همه ایستگاه‌های یکسان نیست. مقدار نشست در کیلومترهای ۳+۴۰۰ از سایر ایستگاه‌های نشست-سنجی بیشتر است. دلیل این امر با توجه به مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در محل ایستگاه، وجود زون‌های رسی و حفرات موجود بین سقف ایستگاه تا سطح زمین در این ناحیه از ایستگاه است.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D به بررسی تاثیر عملیات تزریق بر میزان جابه‌جایی‌های سطح زمین بعد از تعریض ایستگاه پرداخته شد. طبق مدلسازی‌های انجام شده نتایج زیر حاصل شد:

- بعد از عملیات تزریق نمونه‌هایی از بخش‌های مختلف زون تزریق شده، گرفته و آزمایش شد. نتایج آزمایش‌های تک محوره و برشی بر روی نمونه‌های گرفته شده از زون تزریقی نشان می‌دهد که عملیات تزریق مدول الاستیسیته خاک را از مقدار ۲۵ مگاپاسکال به ۱۴۰۰ مگاپاسکال، چسبندگی را از مقدار ۱۷ کیلوپاسکال به ۱۳۰ کیلوپاسکال و چسبندگی خاک را از ۳۵ درجه به ۸۵ درجه افزایش می‌دهد.

- مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تزریق در پیرامون ایستگاه، با توجه به جنس خاک تزریق شده، مشخصات دوغاب، فشار تزریق و عمق قرارگیری ایستگاه با ایجاد بستری صلب نشست سطح زمین را در بدترین شرایط از مقدار ۱۳/۶۴ سانتی‌متر به ۱۰/۱ سانتی‌متر کاهش می‌دهد به نحوی که پس از عملیات تزریق و تعریض ایستگاه، نشست سطحی به مقداری می‌رسد که برای همه سازه‌های سطحی مجاور ایستگاه، بی‌خطر محسوب می‌شود.

- در ایستگاه E استفاده از روش تزریق روش مناسبی برای کاهش نشست‌های سطح زمین محسوب می‌شود به طوری که در تمامی مقاطع اندازه‌گیری

[۱۳]. کولیوند، ف.، شریف زاده، م. (۱۳۹۲). "مطالعه تاثیر وزن و هندسه ساختمان بر نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی مرحله ای با استفاده از روش عددی اجزای محدود". نشریه مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی، دوره دوم، شماره دوم، ۱۳۳-۱۴۳.

[۱۴]. شرکت مهندسين مشاور زمین پروژه. (۱۳۸۳). "گزارش عملیات و مطالعات ژئوتکنیک پروژه قطار شهری کرج و حومه".

[۱۵]. شرکت مهندسان مشاور دریا خاک پی. (خرداد ۱۳۸۴). "گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک قطعه دوم مسیر مصوب قطار شهری کرج و حومه".

[۱۶]. اسدالهی، ا. (۱۳۹۴). "بررسی تاثیر عملیات بهسازی و تقویت زمین بر تغییر شکل ها و پایداری تونل- مطالعه موردی: ایستگاه E خط ۲ متروی کرج". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن.

compression strength and modulus of deformation of cemented soil". Chin J Rock Soil Mech 30(2), 473-477.

[7]. Uddin, K., Balasubramaniam, A., & Bergardo, D. (1997). "Engineering behaviors of cement-treated Bangkok soft clay". Geotech Eng J 28(1), 89-119.

[8]. Tang, Y., Liu, H., & Zhu, W. (2000). "Engineering properties of soil-cement mixes". Chin J Geotech Eng 22(5), 549-554.

[9]. Lorenzo, G., & Bergado, D. (2006). "Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing". J Master Civ Eng 18, 161-174.

[10]. Lee, F., Lee, Y., Chew, S., & Yong, K. (2005). "Strength and modulus of marine clay-cement mixes". J Geoenviron Eng 131(2), 178-186.

[۱۱]. سازمان قطار شهری کرج و حومه. (۱۳۸۲). "معرفی طرح متروی قطار شهری کرج و حومه".

[۱۲]. کاتبی، ه.، سعدین، م. (۱۳۸۹). "تحلیل و پیش بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی - مطالعه موردی: پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره چهارم، ۶۷-۸۵.