

چکیده

روش انجماد مصنوعی زمین به عنوان یک روش بدیع مطرح می‌گردد که نه تنها از لحاظ فنی و اقتصادی قابل قبول است بلکه دوستاندار محیط‌زیست بوده و در تمامی انواع خاک‌ها و شرایط آب زیرزمینی قابل استفاده است. هدف از این مطالعه، تحلیل و طراحی مکانیکی دیوار خاک منجمد تحت تأثیر کاهش دما و عبور بار ترافیکی می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب اصلاح شده که با بهره‌گیری از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی خاک منجمد، صحت‌سنجی شده است، به شبیه‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود دیوار خاکی منجمد و بررسی پارامتری آن توسط نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. مطابق نتایج آزمایش‌ها، رفتار نرم‌شونده در تمامی نمونه‌های خاک منجمد به وضوح مشاهده می‌شود و نمودارهای تنش- کرنش یک قله^۱ و یک حالت پس‌ماند^۲ از خود نشان می‌دهند. نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد تحت تأثیر گودبرداری به سمت داخل گود در مقطع وسط دیوار بیشتر از مقطع تکیه‌گاه دیوار بوده و تأثیر عبور بار ترافیکی بر روی مقطع وسط دیوار و افزایش تغییر مکان جانبی آن بیشتر از مقطع تکیه‌گاه دیوار می‌باشد. همچنین قابل ملاحظه است که کاهش دما از ۶- تا ۱۱- درجه سانتی‌گراد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد در مقطع تکیه‌گاه ندارد (حدود ۲ تا ۳ درصد)، درحالی‌که در مقطع وسط دیوار کاهش دما در محدوده مذکور تا حدود ۱۳ درصد منجر به کاهش تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود می‌شود.

واژگان کلیدی: انجماد مصنوعی خاک، روش اجزای محدود، آزمایش فشار سه‌محوری، بار ترافیکی، متروی تبریز.

تأثیر بار ترافیکی بر گودبرداری نگهداری شده توسط انجماد مصنوعی زمین؛ مطالعه موردی: قطار شهری تبریز

مهزاد اسمعیلی فلک

دانشجوی دکتری، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

هوشنگ کاتبی (نویسنده مسئول)

دانشیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
 katebi@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

است. همچنین هیچ کدام از این روش‌ها در تمامی انواع خاک‌ها قابل استفاده نیستند. همچنین مشکل آب زیرزمینی نیز استفاده از آنها را محدود می‌کند. در مقابل، روشی وجود دارد که تاکنون در ایران مورد استفاده قرار نگرفته است؛ روش انجماد مصنوعی زمین به عنوان یک روش بدیع مطرح می‌گردد که نه تنها از لحاظ فنی و اقتصادی قابل قبول است بلکه دوستاندار محیط‌زیست بوده و در تمامی انواع خاک‌ها و شرایط آب زیرزمینی قابل استفاده است. این روش هیچ ماده شیمیایی و سمی‌ای وارد خاک و آب زیرزمینی نمی‌کند و موجب تغییر بافت خاک نمی‌گردد. انجماد مصنوعی زمین عبارت از گردش یک مایع مبرد خنک

ارتقاء و توسعه شبکه حمل و نقل در مناطق شهری اغلب منجر به عملیات گودبرداری و تونل‌سازی می‌گردد. امروزه در کشور ایران روش‌های متفاوتی به منظور بهسازی و نگهداری موقت گودبرداری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. متداول‌ترین این روش‌ها عبارتند از: میخ‌کوبی، انواع تزریق‌ها، پیچ‌سنگ‌ها، شمع‌کوبی، سپرکوبی و دیوار دیافراگمی. هر یک از این روش‌ها دارای مزایایی می‌باشند ولی در مقابل دارای معایب قابل توجهی نیز هستند. به عنوان مثال تمامی این روش‌ها با توجه به فرآیند تولید و یا وارد کردن ماده مصنوعی به آب زیرزمینی یا خاک دارای مشکل زیست‌محیطی بوده و بحث آلاینده‌گی در آنها مطرح

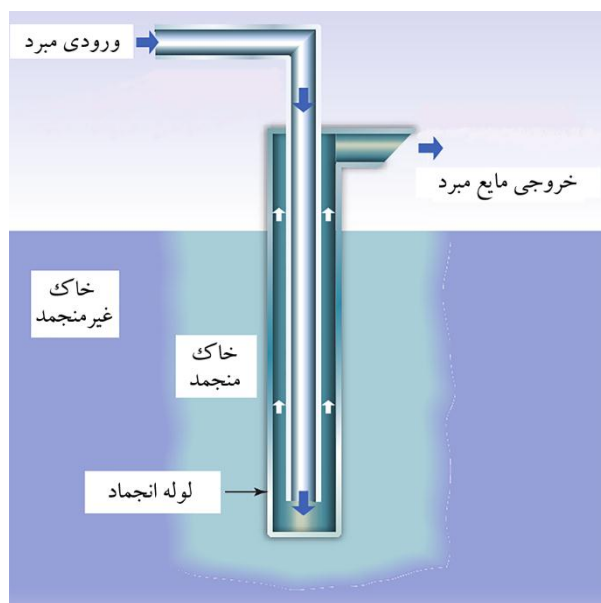
جزو روش های اقتصادی و مقرون به صرفه جهت بهسازی موقت خاک معرفی نمود [۱۱-۱۳].

در ادبیات فنی، نتایج بسیار محدودی از آزمایش بر روی خاک منجمد و به ویژه مدل سازی سه بعدی اجزای محدود دیوار خاک منجمد وجود دارد. از این رو گزیده‌ای از مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی خاک منجمد در ادامه ارائه می گردد. علم رفتار تنش-کرنش خاک منجمد و مدل سازی عددی آن در رابطه با انجماد مصنوعی زمین، برای مهندسی ژئوتکنیک از اهمیت بسیاری برخوردار است.

همان گونه که اشاره شد، خروج مصنوعی گرما خاک را به طور موقت و به صورت درجا منجمد می کند و آن را به عنوان یک المان تکیه گاه استاتیکی معرفی می کند. اولین کاربرد ثبت شده روش انجماد مصنوعی زمین بر روی یک پروژه ورودی معدنی در سوآنسی^۳، ولز جنوبی^۴ انجام شد [۱۴]. هر چند در طی سال های اخیر، مطالعاتی بر روی خواص مکانیکی خاک های منجمد و شبیه سازی عددی انجماد مصنوعی زمین انجام شده اند [۱۵-۲۴]، اما در مقایسه با خاک های غیر منجمد، هنوز جای کار بسیاری وجود دارد. اولین و مهم ترین مطالعات انجام شده بر روی خاک منجمد عمدتاً بر روی رفتار خزشی خاک هایی چون ماسه، لای و رس متمرکز شده اند [۲۵-۲۷]. در این مطالعات مؤلفه چسبندگی به ماتریس یخ نسبت داده شده و به مقدار و مقاومت یخ و ناحیه تماس بین یخ و خاک بستگی دارد که هر کدام تابعی از دما هستند. اما بر خلاف نظریه فوق، پژوهش ها نشان داده اند که حتی در دماهای پایین تر از صفر درجه و بدون حضور هیچ گونه آلاینده ای، مقداری آب غیر منجمد در خاک منجمد باقی می ماند و به صورت نواری باریک پیرامون ذرات خاک را احاطه کرده و مانع از تماس مستقیم و اندرکنش خاک و ماتریس یخ می گردد [۱۳ و ۲۸].

مفهوم تغییر شکل الاستوپلاستیک در بطن بسیاری از سازه های ژئوتکنیکی قرار دارد. به منظور تشریح رفتار تغییر شکل الاستوپلاستیک خاک منجمد، تعدادی مدل رفتاری توسط پژوهشگران مختلف در طی سال های اخیر پیشنهاد شده اند.

شده از طریق لوله های انجماد دوجداره مستقر درون زمین به منظور استخراج گرما تا دماهای زیر صفر درجه سلسیوس می باشد. مطابق شکل (۱)، درون هر لوله انجماد دو جداره، یک لوله با قطر کوچک تر نصب شده است که از طریق آن مایع مبرد وارد لوله انجماد شده و پس از رسیدن به پایین ترین نقطه از جداره بیرونی به سمت بالا حرکت کرده و گرمای محیط اطراف را می گیرد. آنگاه آب موجود در خاک منجمد شده و مقاومت برشی آن به شدت افزایش یافته و به یک مصالح آب بند بدل می گردد [۱-۹].



شکل (۱): تصویر شماتیک لوله انجماد دوجداره [۱۰].

در سال های اخیر، انجماد مصنوعی زمین نه تنها برای تونل ها، بلکه جهت گودبرداری های عمیق نیز مورد استفاده قرار می گیرد. در سال های پیشین، هزینه های بالای روش انجماد مصنوعی زمین در مقابل مزایای فنی آن قرار می گرفت. امروزه طراحی های سازه ای دقیق تر و شناخت کامل تر رفتار خاک های منجمد منجر به طراحی های ظریف تری می شوند که مدت زمان انجماد و در نتیجه هزینه ها را به شدت کاهش می دهند. از طرفی، امروزه شرکت های پیمانکار با تخصص انجماد مصنوعی زمین تشکیل شده اند که در بلند مدت مشکلی از بابت بازگشت سرمایه نخواهند داشت. بنابراین می توان روش انجماد مصنوعی زمین را

زمینه‌های کاربردی مورد استفاده قرار گیرد. در این مدل عددی، لوله انجماد و خاک اطراف آن مد نظر قرار گرفته‌اند. مدل پیشنهادی دارای قابلیت پیش‌بینی تبادل حرارت در طی فرآیند انجماد مصنوعی زمین بوده و می‌تواند برای تعیین شرایط مرزی در لوله و نیز مطالعه پارامتری به منظور بهینه‌سازی شرایط انجماد و تبرید مورد استفاده قرار گیرد. از معایب این مدل می‌توان به عدم در نظر گرفتن اثرات جریان آب زیرزمینی اشاره نمود [۳۳].

در نهایت، در جدیدترین مطالعه‌ای که سال ۲۰۱۶ انجام شده است، رفتار الاستوپلاستیک خاک منجمد در معرض بارهای تکرارشونده بلند مدت مورد بررسی قرار گرفته و مدل رفتاری خاک منجمد تحت شرایط مذکور و با ترکیب معادلات تجربی و تئوری الاستوپلاستیک متعارف معرفی شده است. مدل مذکور برای خاک‌های منجمد با استفاده از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری [۳۴] صحت‌سنجی شده است. این مطالعه اولین تلاش به‌منظور مدل‌سازی رفتار الاستوپلاستیک تحت بارهای تکرارشونده بلند مدت برای خاک منجمد می‌باشد [۳۵].

مقاله حاضر طراحی مکانیکی و سازه‌ای دیوار خاک منجمد تحت سربار ترافیکی در اعماق مختلف گودبرداری و دماهای متفاوت دیوار خاک منجمد را در بر می‌گیرد. هدف از این مطالعه، فراهم نمودن درکی از سیستم‌های تکیه‌گاه موقتی خاک منجمد برای گودبرداری‌هایی همچون ایستگاه‌های مترو در مجاورت شریان‌های درون‌شهری می‌باشد. در این مطالعه تأثیرات مذکور بر پایداری سازه‌ای دیوار خاک منجمد ایستگاه متروی قسمت مرکزی خط ۲ قطار شهری تبریز، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سعی بر آن خواهد بود تا از تحلیل و طراحی دیوارهای خاکی منجمد ظریف‌تر و سبک‌تر بهره گرفته شود تا این روش به‌عنوان یک فناوری مقرون‌به‌صرفه مقبول واقع گردد. به عبارت دیگر، هدف از این مطالعه، حصول درکی از تأثیر گودبرداری در دماهای مختلف تحت سربار ترافیکی بر پایداری سیستم تکیه‌گاه موقتی خاک منجمد برای گودبرداری‌های روبازای همچون حفاری ایستگاه‌های مترو به روش کند و پوش است.

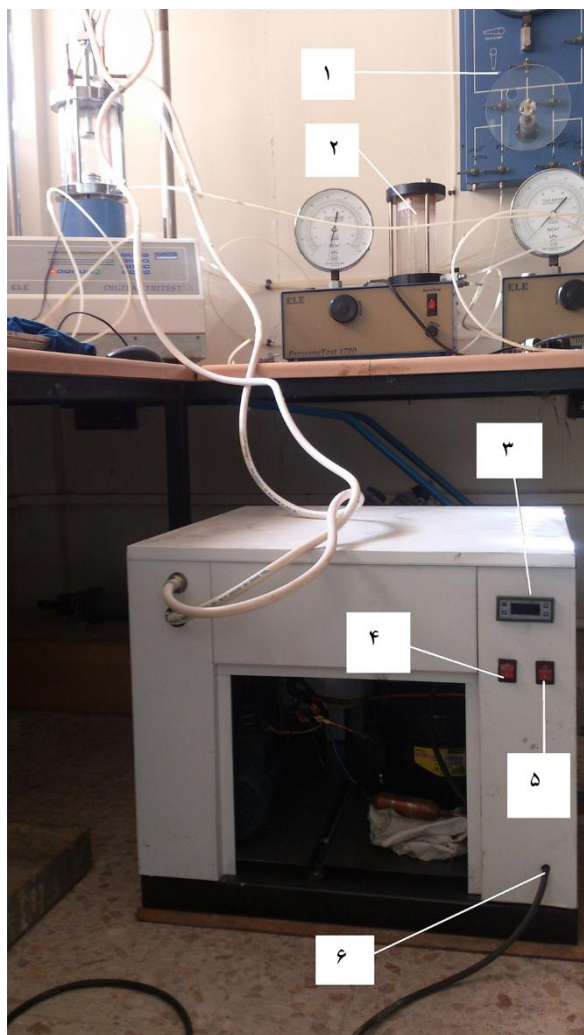
در مطالعه‌ای بر اساس تعادل، پیوستگی و اصول انرژی در یک محیط تخلخل چندفازی، مدل کوپلی حرارتی- هیدرولیکی- مکانیکی برای شبیه‌سازی رفتار خاک منجمد با در نظر گرفتن نیروی اندرکنش بین یخ و اسکلت خاک تعیین گردید. نتایج نشان دادند که انجماد و ذوب نه تنها به دما بلکه به حرکت آب غیر منجمد نیز بستگی دارند. با کاهش ضریب نفوذپذیری خاک، به‌طور آشکاری زهکشی آب منفذی انجماد کاهش می‌یابد [۲۹].

مدل‌سازی تئوریک رفتار خاک منجمد غیراشباع توسط جمعی از محققین در سال ۲۰۰۸ انجام شده است که در این مطالعه فاز هوای خاک منجمد غیراشباع بیشتر مورد بحث قرار گرفته و یک چارچوب مدل‌سازی تئوریک کوپلی حرارتی- هیدرولیکی- مکانیکی برای یک محیط متخلخل چندفازی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که چارچوب مدل‌سازی تئوریک پیشنهادی و راه‌حل‌های عددی آن برای رفتار کوپلی حرارتی- هیدرولیکی- مکانیکی مناسب و قابل قبول هستند [۳۰].

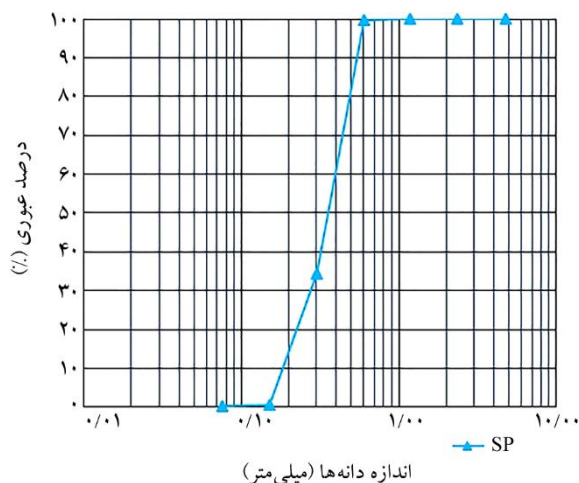
در سال ۲۰۱۰ مدل محاسباتی الاستوپلاستیک جهت شبیه‌سازی یک لوله نفتی مدفون در زمین منجمد ارائه گردید. نتایج محاسباتی اثر بلند شدگی ناشی از انجماد نشان دادند که تنش مؤثر روی لوله مدفون به‌صورت خطی نسبت به تغییر شکل بلند شدگی انجماد افزایش می‌یابد. در نهایت نتایج این مطالعه نشان داد که بلند شدگی ناشی از انجماد نسبت به نشست ناشی از ذوب شدگی دارای اهمیت به مراتب بیشتری است [۳۱].

جمع دیگری از محققین بر اساس نتایج آزمایشگاهی، یک مدل ریاضی برای بلند شدگی ناشی از انجماد با متغیرهای دما، پوکی و تغییر شکل پیشنهاد نمودند. لنز یخی یکی از مهم‌ترین دلایل وقوع پدیده بلند شدگی ناشی از انجماد می‌باشد. در نهایت مدل رفتاری ارائه شده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و عملی قابل قبول معرفی شده است [۳۲].

به تازگی مطالعه و بررسی مسئله انتقال حرارت به‌منظور توسعه یک مدل حرارتی انجام شده است که بتواند به‌سادگی در



شکل (۲): واحد تبرید متصل به دستگاه سه‌محوری: (۱) سیستم کالیبراسیون تنش، (۲) سیستم اعمال فشار همه‌جانبه، (۳) ترموستات - ترمومتر، (۴) کلید پمپ، (۵) کلید انجماد، (۶) تأمین انرژی.



شکل (۳): منحنی دانه‌بندی خاک منجمد مورد استفاده در مطالعه عددی و آزمایشگاهی.

۲- تعیین پارامترهای ورودی مدل‌سازی عددی توسط آزمون‌های آزمایشگاهی

پیش از استفاده از هر نوع مصالح بدیع و شبیه‌سازی عددی آن، شناسایی خواص مکانیکی آن ضروری می‌باشد. در این شبیه‌سازی عددی، پارامترهای مکانیکی مورد استفاده به‌منظور مدل‌سازی خاک منجمد به‌طور مستقل توسط انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند. برای به دست آوردن پارامترهای مکانیکی و مدل رفتاری مناسب خاک مورد مطالعه، لازم است که مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های تهیه شده خاک مذکور در حالت منجمد انجام شوند. با توجه به مسائل اقتصادی و رقابتی در حوزه استفاده از روش انجماد مصنوعی زمین و نیز قابلیت استفاده از این روش در فناوری انرژی اتمی، تهیه دستگاه آزمایش سه‌محوری برای خاک منجمد از بازارهای بین‌المللی کار دشواری به نظر می‌رسد. از این رو به‌منظور انجام این پژوهش، یک دستگاه آزمایش سه‌محوری برای خاک‌های منجمد با قابلیت کنترل دما، تنش محدودکننده و نرخ کرنش (کرنش کنترل) در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد. لازم به ذکر است که این محصول در مرکز مالکیت معنوی سازمان ثبت اسناد و املاک کشور به ثبت رسیده و در جشنواره رویش البرز سال ۱۳۹۶ بنیاد ملی نخبگان به‌عنوان اختراع برتر معرفی شده است. تصویر این دستگاه در شکل (۲) نمایش داده شده است.

در این مطالعه از خاک دانه‌ای حاصل از گمانه‌های مطالعاتی بخش مرکزی خط ۲ قطار شهری تبریز استفاده شده است. مشخصه‌های فیزیکی و دانه‌بندی خاک مورد استفاده به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۳) نمایش داده شده‌اند. همچنین، از آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده استفاده گردید. دلیل انتخاب این آزمایش، شبیه‌سازی دقیق شرایط برجای کوتاه‌مدت زمین به‌منظور مطالعه موردی می‌باشد. میانگین محدودکنندگی در جای خاک در ارتفاع دیواره ایستگاه مترو ۱۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد که در آزمایش‌ها مد نظر قرار گرفته است.

جدول (۱): خواص مکانیکی خاک غیرمنجمد.

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (کیلو نیوتن بر متر مربع)	مقدار رس و لای (%)	مقدار ماسه (%)	مقدار شن (%)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن واحد اشباع (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	سنگینی ویژه	طبقه بندی خاک
۰/۳	۴۰۰۰۰	۱/۲	۹۸/۸	صفر	۳۳	۱۹/۱	۲/۶۳۵	SP

از آنجایی که آزمایش‌های سه محوری به صورت تحکیم نیافته زهکشی نشده انجام شده‌اند، تنها پارامتر مقاومتی که حاصل شده است، مقاومت برشی زهکشی نشده می‌باشد. نتایج به دست آمده در این بخش به عنوان پارامترهای ورودی تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی‌های پیشین، وابستگی نسبت پواسون خاک منجمد به دما را به وضوح اثبات نموده‌اند. از این رو به منظور محاسبه نسبت پواسون در دماهای مختلف، از روابط پیشنهادی برخی از محققین به شرح زیر استفاده شده است [۳۶-۳۷]. پارامترهای ورودی خاک منجمد برای هر دمای مدل عددی نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

$$v = 0.4 - 0.008|T| \quad (1)$$

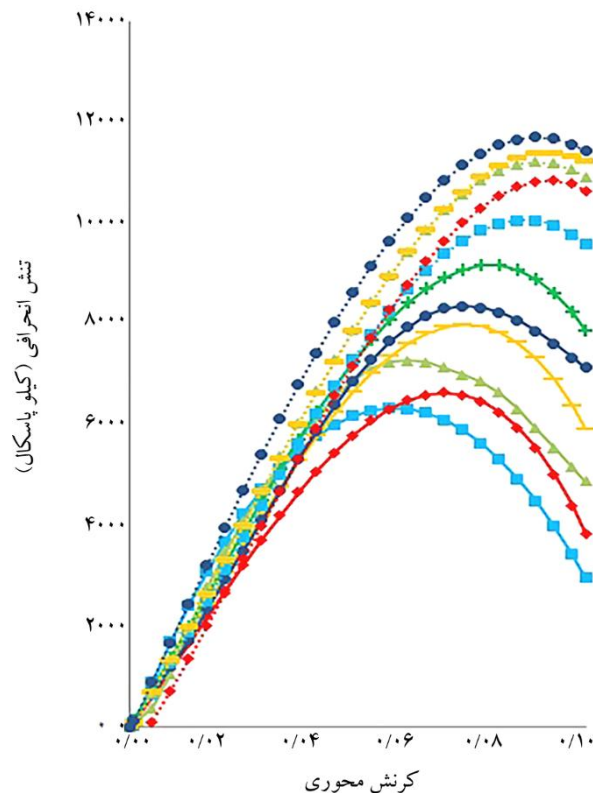
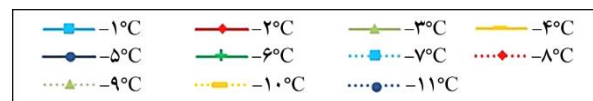
جدول (۲): خواص و پارامترهای ورودی مدل برای خاک منجمد.

مدول الاستیسیته (KPa)	ضریب پواسون	مقاومت برشی مصالح دیوار (KPa)	φ (°)	دمای دیوار (°C)
۱۳۹۰۲۴/۲	۰/۳۵۲	۴۵۲۶/۲۸	صفر	-۶
۱۴۵۴۰۴/۵	۰/۳۴۴	۴۷۷۶/۱۶	صفر	-۷
۱۵۶۹۶۷/۶	۰/۳۳۶	۵۱۵۱/۸۹	صفر	-۸
۱۶۱۶۹۱/۸	۰/۳۲۸	۵۲۹۲/۶	صفر	-۹
۱۶۸۳۰۴/۷	۰/۳۲	۵۴۲۲/۸۶	صفر	-۱۰
۱۷۴۹۵۳/۹	۰/۳۱۲	۵۵۶۳	صفر	-۱۱

۳- مدل سازی عددی (روش تحلیل، هندسه مدل، شرایط مرزی، تحلیل حساسیت و روش اعمال بار ترافیکی)

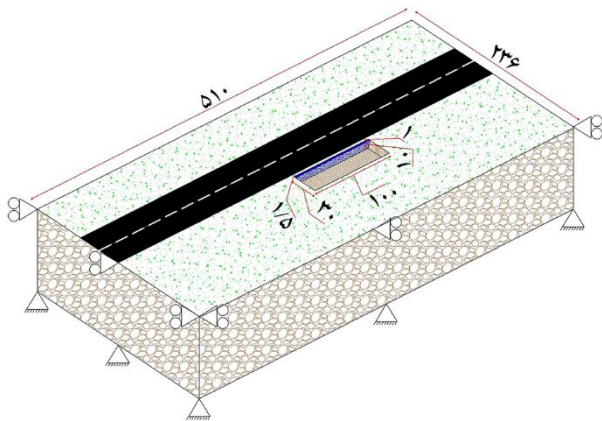
مدل رفتاری موهر- کولمب^۵ در عین سادگی جزو مدل‌های قدرتمند و پر کاربرد جهت شبیه سازی رفتار مصالح ژئوتکنیکی

مطابق نتایج آزمایش‌ها، رفتار نرم شونده در تمامی نمونه‌های خاک منجمد به وضوح مشاهده می‌شود و نمودارهای تنش- کرنش یک قله و یک حالت پس ماند از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمایش سه محوری بر روی خاک منجمد نشان می‌دهند که با کاهش دما مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بدانه بندی شده منجمد به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. نمونه‌ای از نتایج آزمایش‌های سه محوری مورد استفاده در مطالعه حاضر، به صورت رفتار نمونه‌های خاک منجمد در دماهای مختلف زیر صفر در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): تأثیر دما بر رفتار تنش- کرنش ماسه منجمد تحت تنش محدود کننده ۱۰۰ کیلو پاسکال.

کاهش می‌یابد. از این رو در مطالعه حاضر از المان مکعبی ۸ گرهی با تعداد انتگرال‌گیری کاهش یافته استفاده شده است. نام المان استفاده شده در مطالعه حاضر از نوع Solid C3D8R و از نوع خطی می‌باشد. با استفاده از ابزار دانه‌بندی و پارتیشن‌بندی، چگالی مش در ناحیه گودبرداری افزایش یافته است تا تحلیل با دقت بالایی انجام شود. شمای سه‌بعدی مسئله به همراه شرایط مرزی در شکل (۵) نشان داده شده است. در تمامی تحلیل‌ها، ضخامت دیوار خاک منجمد ۱ متر و ارتفاع آن ۱۵ متر در نظر گرفته شده است.



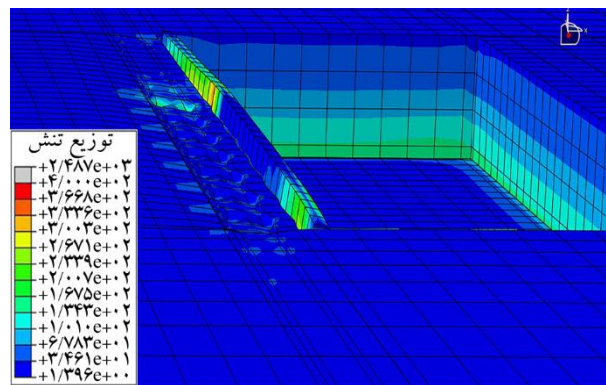
شکل (۵): شمای سه‌بعدی مسئله به همراه شرایط مرزی.

برنامه‌ریزی تحلیل مدل‌سازی بدین ترتیب می‌باشد که برای شش دمای مختلف (6°C تا -11°C) دیوار خاک منجمد نگه‌دارنده یک گودبرداری ۱۰ متری، تأثیر یک سربار ترافیکی با فاصله ۱/۵ متری امتداد بار ترافیکی از امتداد دیوار خاک منجمد بررسی می‌شود. گودبرداری به روش کند و پوش در نظر گرفته شده است که به منظور شبیه‌سازی آن، گودبرداری در ۵ گام ۲ متری به مدل اعمال می‌گردد. نحوه مدل‌سازی هر گام گودبرداری به ترتیبی انجام می‌شود که با حذف کف گود به عمق ۲ متر، تأثیر نیروی گرانشی و جانبی قسمت حذف شده خشی می‌گردد. شکل (۶)، تصویر تغییر شکل و توزیع تنش بر روی دیوار خاک منجمد تغییر شکل یافته در دمای 9°C - پس از اعمال بار ترافیکی و ۱۰ متر گودبرداری را در محیط نرم‌افزار نشان می‌دهد.

می‌باشد که قابلیت مدل‌سازی رفتار الاستوپلاستیک را داراست. انتخاب مدل رفتاری مناسب به منظور شبیه‌سازی رفتار مصالح خاکی مهم‌ترین بخش و ابتدایی‌ترین قسمت حل مسائل عددی می‌باشد. رفتار خاک منجمد، غیرخطی بوده، سختی و مقاومت آن به دما، فشار محدودکننده، نرخ کرنش و سطح تنش و کرنش وابسته است. انتخاب یک مدل رفتاری مناسب که به خوبی رفتار مصالح را تشریح کند، نقش مهمی در دقت و اعتبار پیش‌بینی‌های عددی بازی می‌کند. در این پژوهش، از مدل رفتاری موهر-کولمب که بر اساس نتایج آزمایشگاهی مذکور در بخش قبلی اصلاح شده و بهبود یافته است، استفاده می‌گردد؛ به طوری که قابلیت مدل‌سازی نرم‌شوندگی رفتار الاستوپلاستیک خاک منجمد را دارا باشد. به منظور اجرای مدل رفتاری مذکور از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۶ نسخه ۳-۱۴/۶ جهت مدل‌سازی سه‌بعدی دیوار خاکی منجمد و بررسی رفتار آن تحت دماهای مختلف استفاده شده است.

جهت جلوگیری از اثرگذاری شرایط مرزی و محدودکنندگی ناشی از آنها بر نتایج مطالعه، تحلیل حساسیت انجام گرفت و ابعاد هندسی مدل اجزای محدود سه‌بعدی $510 \times 236 \times 100$ متر به دست آمد که دیوار منجمد خاکی به طول ۱۰۲ متر در آن مدل‌سازی شده است. این مدل در مجموع از ۲۸۷۷۵ المان و ۳۵۹۷۶ گره تشکیل شده است. در کف مدل از تکیه‌گاه مفصلی و در دیواره‌های مدل از تکیه‌گاه غلتکی استفاده شده است. در مسائل ژئوتکنیکی المان‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بتوانند چگونگی تغییر هندسه در طول تحلیل را به خوبی مدل‌سازی کنند. از طرفی روابط اجزاء محدود برای المان‌های شش‌وجهی^۷ برای فرموله شدن مقدراری راحت‌تر هستند [۳۸]. بنابراین در این مطالعه برای شبکه‌بندی مدل از المان‌های شش‌وجهی استفاده شده است. از آنجایی که المان‌های با انتگرال‌گیری کاهش یافته از تعداد نقاط انتگرال‌گیری کمتری برای ساخت ماتریس سختی استفاده می‌کنند و لذا زمان تحلیل با استفاده از این المان‌ها خصوصاً در تحلیل‌های سه‌بعدی، به شدت

نشان داده شده در شکل (۷) در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است [۳۹]. در این مدل از یک بار گسترده (p) به عرض ۳ متر و در طول کل جاده و نیز ۶ بار متمرکز (A/2) که به عنوان مدل اثر چرخ خودروها می‌باشند، استفاده شده است. مقدار بار گسترده برای خط‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۴، ۳ و ۲ کیلونیوتن بر متر مربع و مقادیر بارهای متمرکز با توجه به استقرار آنها در خط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۲۵۰، ۱۷۰ و صفر کیلونیوتن می‌باشد. منظور از خط ۱ نزدیک‌ترین خط به گود و خط ۳ دورترین خط می‌باشد. در این مطالعه پس از اعمال گام‌های اولیه، نیروی گرانشی و گودبرداری به روش کند و پوش، با استفاده از مدل فوق در ۱۲ گام با فاصله‌های مشخص، بار ترافیکی از کنار دیوار خاکی منجمد نگه‌دارنده گودبرداری عبور داده می‌شود.



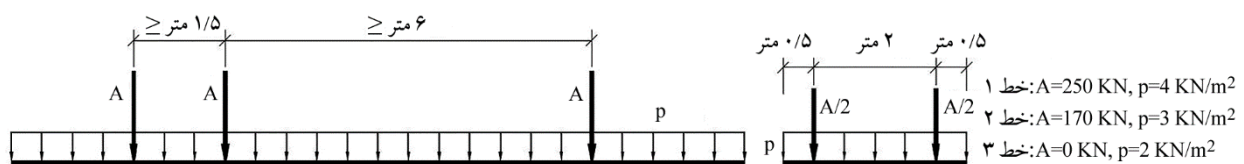
شکل (۶): تغییر شکل گود و دیوار خاکی منجمد در دمای 10°C - پس از گودبرداری تا عمق ۱۰ متر و تحت سربار ترافیکی.

۳-۱- بارگذاری ترافیکی

طراحی و ارزیابی سازه‌های ژئوتکنیکی در نزدیکی جاده‌ها و شریان‌ها مستلزم پیش‌بینی اثرات حداکثر باری است که ممکن است به سازه اعمال شود. بار ترافیکی، بزرگ‌ترین قسمت از اثرات بار خارجی کل وارد بر سازه‌های ژئوتکنیکی مذکور می‌باشد. هرچند، مدل‌سازی دقیق اثر واقعی بار ترافیکی بر سازه‌ها به دلیل ماهیت تصادفی آن بسیار دشوار است. از این‌رو، مدل‌های بار ترافیکی طراحی ارائه شده در آیین‌نامه‌های مختلف، ماهیتی محافظه‌کارانه دارند. این بارها با بزرگ‌ترین بارهای وارد بر سازه‌های ژئوتکنیکی در کل طول عمرشان متناسب هستند. در حالی که دیوار خاک منجمد یک سازه ژئوتکنیکی موقت می‌باشد و طراحی برای بزرگ‌ترین بار ممکن، می‌تواند غیر اقتصادی و غیر منطقی باشد. از طرفی، بارهای طراحی دست پایین نیز ممکن است منجر به گسیختگی و تخریب سازه ژئوتکنیکی به همراه بسیاری از صدمات متعاقب این تخریب شود. یک طراحی صحیح، تنها زمانی ممکن خواهد بود که مشخصه‌های آماری بارهای ترافیکی وارده در یک دوره بازگشت منطقی در نظر گرفته شده باشند. از این‌رو مدل ترافیکی

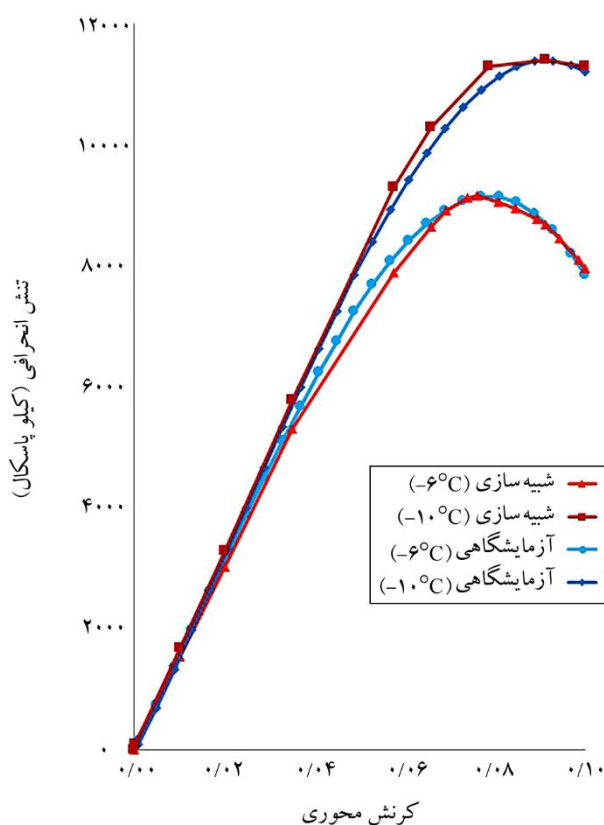
۳-۲- تأیید صحت سنجی مدل رفتاری خاک منجمد

مدل‌های رفتاری متعارف مصالح خاکی به دو گروه قابل تقسیم هستند: مدل‌های تجربی حاصل از برآزش داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های تئوری که می‌توانند بر اساس تئوری پتانسیل پلاستیک به دست آیند. در این مطالعه از مدل رفتاری موهر-کولمب اصلاح شده بر اساس برآزش داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری بر روی خاک منجمد به منظور مدل‌سازی رفتار خاک منجمد بهره گرفته شده است. در این راستا، آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی نشده بر روی خاک منجمد در دماهای مختلف در نرم‌افزار آباکوس به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی گردید. با توجه به ابعاد کوچک نمونه آزمایشگاهی و شرایط برجای خاک، مقدار فشار همه‌جانبه در طول آزمایش ثابت نگه داشته شده و سطح پایینی مدل با نرخ تغییر مکان ثابت به منظور ارائه تنش انحرافی، به سمت بالا حرکت داده شد.



شکل (۷): مدل بار ترافیکی مورد استفاده در مدل عددی [۳۹].

دانه بندی شده منجمد را با دقت قابل قبولی شبیه سازی می نماید که این امر نشان دهنده ی مطابقت نتایج شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی است و صحت نتایج مدل عددی را اثبات می کند. البته لازم به ذکر است که قسمت های غیرخطی رفتار خاک منجمد به صورت چندخطی مدل شده اند تا علاوه بر دقت قابل قبول، به سادگی قابل مدل سازی باشند.

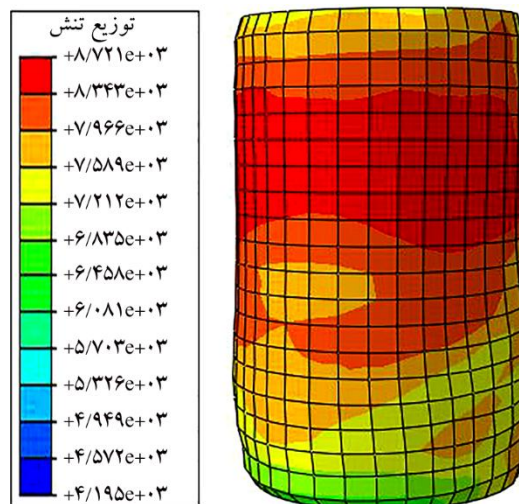


شکل (۹): نمونه نمودارهای تنش-کرنش حاصل از نتیجه آزمایش و شبیه سازی اجزاء محدود.

۴- نتایج و بحث

بر اساس شرایط مرزی، هندسه مدل و خواص مکانیکی مصالح خاک منجمد و غیر منجمد که در بخش قبلی ارائه گردید، به کمک مدل سازی سه بعدی اجزای محدود، تأثیر بار ترافیکی بر پایداری گودبرداری نگه داشته شده توسط دیوار خاک منجمد مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین تأثیر کاهش دمای دیوار خاک منجمد بر رفتار و پایداری گود و نیز خود دیوار بررسی شد که در ادامه به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

با در نظر گرفتن منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش سه محوری انجام گرفته بر روی مصالح دیوار خاک منجمد، به ارزیابی مدل رفتاری مورد استفاده در این مطالعه پرداخته شد. شکل (۸)، تغییر شکل و سطوح تنش های مدل اجزای محدود سه بعدی آزمایش سه محوری در انتهای آزمایش را نشان می دهد.

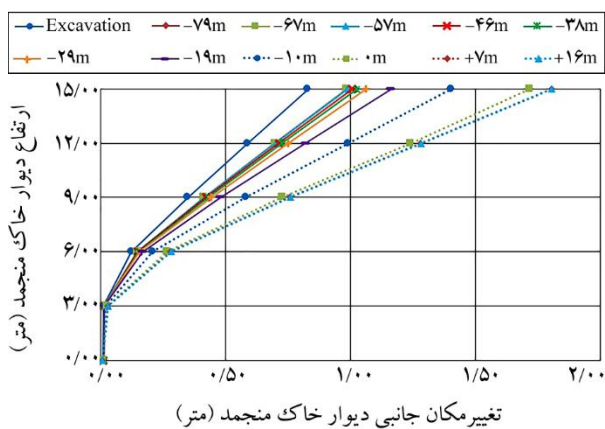


شکل (۸): مدل سازی سه بعدی خاک منجمد تحت آزمایش سه محوری- مدل تغییر شکل یافته در انتهای آزمایش.

در این بخش، با کمک چند پارامتر به دست آمده از آزمایش های سه محوری انجام شده در آزمایشگاه و به کمک روش سعی و خطا، پارامترهای مجهول در محدوده مناسب، در مدل ساخته شده، امتحان شده و رفتار تنش-کرنش هر مدل با پارامترهای مختلف، رسم می شوند. سپس نمودارهای به دست آمده از مدل سازی عددی و نتایج آزمایش با یکدیگر مقایسه شده و پارامترهای مربوط به نمودار نزدیک تر به نتایج نمونه آزمایشگاهی، به عنوان پارامترهای مدل رفتاری انتخاب می شوند. به عنوان نمونه در شکل (۹)، نمودارهای تنش-کرنش شبیه سازی شده و آزمایشگاهی (اندازه گیری شده) آزمایش سه محوری تحت دماهای -6°C و -10°C بر روی مصالح دیوار خاک منجمد نشان داده شده اند.

با بررسی شکل (۹) ملاحظه می شود که مدل رفتاری موهر-کولمب اصلاح شده، رفتار غیرخطی و نرم شوندگی ماسه بد

پس از عبور بار ترافیکی از مقطع دیوار نیز به ۱۸۰ سانتی متر رسیده است. به نظر می‌رسد که این تغییر مکان‌ها بسیار بزرگ و غیرقابل قبول هستند. اما در عین حال گسیختگی سازه‌ای در بدنه دیوار رخ نداده است که نشان از قابلیت بالای شکل‌پذیری و جذب انرژی دیوار خاک منجمد می‌باشد. با این اوصاف چنین تغییر مکان‌های جانبی در پروژه‌های واقعی، قابل قبول نیست و قطعاً بایستی از مهاربند و پشت‌بند جهت کنترل تغییر مکان دیوار خاک منجمد استفاده نمود.



شکل (۱۰): تأثیر عبور بار ترافیکی بر توزیع تغییر مکان جانبی در ارتفاع دیوار خاک منجمد در دمای -11°C در مقطع وسط دیوار و گودبرداری به عمق ۱۰ متر.

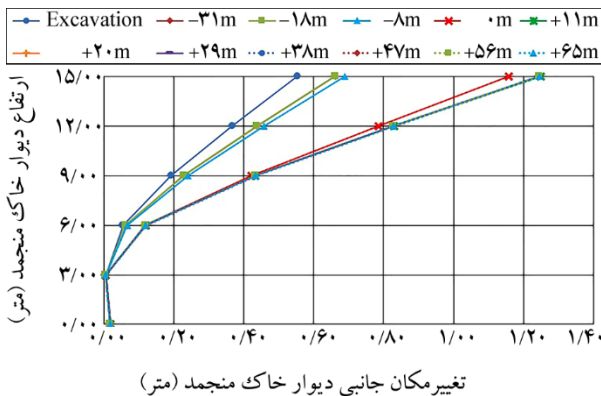
شکل (۱۱) تأثیر عبور بار ترافیکی بر تغییر مکان جانبی در ارتفاع دیوار خاک منجمد در دمای -7°C در مقطع وسط دیوار را نشان می‌دهد. علامت منفی مقابل راهنمای نمودار در این شکل نشان‌دهنده فواصل قبل از رسیدن به مقطع انتخابی دیوار و علامت مثبت نیز فواصل پس از عبور از مقطع انتخابی را نشان می‌دهد. مشابه شکل (۱۰) در این شکل نیز ملاحظه می‌شود که گودبرداری و حرکت بار ترافیکی از ۷۹ متر قبل از مقطع انتخابی تا ۷ متر پس از مقطع انتخابی، تغییر مکان جانبی را افزایش داده است اما پس از آن تغییر مکان کاملاً ثابت مانده است؛ به طوری که گودبرداری به عمق ۱۰ متر منجر به ۸۶ سانتی متر تغییر مکان جانبی تاج دیوار شده است. در فاصله ۱۰ متر مانده به مقطع دیوار، در مقابل مقطع دیوار و ۷ متر پس از

۴-۱- بررسی تأثیر بار ترافیکی بر پایداری دیوار خاکی منجمد

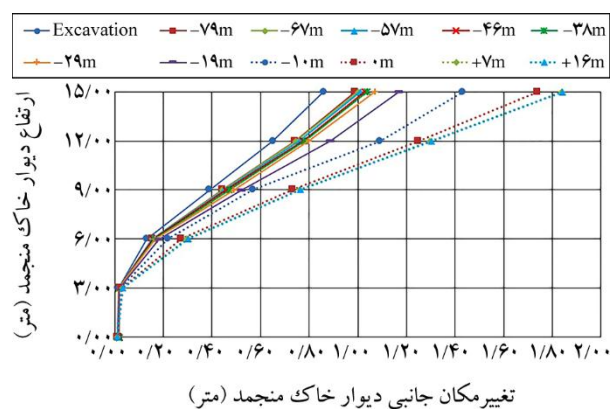
در این مطالعه، تأثیر بار ترافیکی عبور کننده از مجاورت گودبرداری نگهداری شده توسط دیوار خاک منجمد بر پایداری دیوار مذکور مورد بررسی قرار گرفته است که مشخصات مدل این بار ترافیکی در بخش قبلی ارائه گردید. ارتفاع دیوار خاک منجمد ۱۵ متر و ضخامت آن ۱ متر مد نظر قرار گرفته است. گودبرداری نیز در پنج گام ۲ متری (در مجموع ۱۰ متر) به مدل اعمال شد؛ به عبارتی عمق مدفون دیوار خاک منجمد ۵ متر منظور گردید. طول دیوار خاک منجمد در امتداد گودبرداری نیز ۱۰۲ متر می‌باشد. برای بررسی اثر تردد و عبور بار ترافیکی بر پایداری و تغییر مکان جانبی دیوار و گود، دو مقطع از طول دیوار انتخاب شده است؛ تکیه‌گاه دیوار (محل تکیه خاک منجمد به خاک غیر منجمد) و مقطع وسط دیوار به فاصله حدود ۵۰ متر از تکیه‌گاه دیوار. در هر یک از این دو مقطع بار ترافیکی از فاصله مشخصی از آنها شروع به حرکت کرده به مقطع مورد نظر می‌رسد و سپس از مقابل آن عبور کرده و تا فاصله‌ای از مقطع که تأثیر درخور توجهی بر مقطع انتخابی نداشته باشد، ادامه یافته و سپس متوقف شده است.

شکل (۱۰) تأثیر عبور بار ترافیکی بر توزیع تغییر مکان جانبی در ارتفاع دیوار خاک منجمد در دمای -11°C در مقطع وسط دیوار را نشان می‌دهد. علامت منفی مقابل راهنمای این شکل نشان‌دهنده فواصل بار ترافیکی قبل از رسیدن به مقطع انتخابی دیوار و علامت مثبت نیز فواصل پس از عبور از مقطع انتخابی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل در تراز سطح زمین، گودبرداری به عمق ۱۰ متر منجر به ۸۳ سانتی متر تغییر مکان جانبی تاج دیوار شده است. با شروع بار ترافیکی از فاصله ۷۹ متر به سمت مقطع انتخابی و تا فاصله ۷ متری پس از آن، مقدار این تغییر مکان جانبی افزایش یافته است، اما پس از دور شدن بار ترافیکی به اندازه بیش از ۷ متر، تأثیری بر تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد نداشته است. مقادیر تغییر مکان‌های جانبی تاج دیوار، هنگامی که بار ترافیکی در ۱۰ متری قبل از مقطع دیوار قرار دارد، ۱۴۰ سانتی متر، به هنگام رسیدن بار ترافیکی به مقابل مقطع دیوار، ۱۷۱ سانتی متر و ۷ متر

به سمت مقطع انتخابی و تا فاصله ۱۱ متری پس از آن، مقدار این تغییر مکان جانبی افزایش یافته است، اما پس از دور شدن بار ترافیکی به اندازه بیش از ۱۱ متر، تأثیری بر تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد نداشته است. مقادیر این تغییر مکان‌های جانبی تاج دیوار، هنگامی که بار ترافیکی در ۳۱ متری قبل از مقطع دیوار قرار دارد، ۶۶ سانتی متر، به هنگام رسیدن بار ترافیکی به مقابل مقطع دیوار، ۱۱۵ سانتی متر و ۱۱ متر پس از عبور بار ترافیکی از مقطع دیوار نیز به ۱۲۴ سانتی متر رسیده است. لازم به ذکر است که مقطع تکیه‌گاه دیوار نسبت به مقطع وسط دیوار در شرایط مشابه، به‌طور میانگین منجر به کاهش تغییر مکان جانبی به میزان ۲۲/۶٪ شده است که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.



عبور از مقابل مقطع دیوار بار ترافیکی به ترتیب منجر به ۱۴۳، ۱۷۴ و ۱۸۴ سانتی متر تغییر مکان جانبی تاج دیوار به سمت داخل گودبرداری شده است. لازم به ذکر است که کاهش دما در شرایط مشابه، به‌طور میانگین منجر به کاهش تغییر مکان جانبی به میزان ۲/۲٪ شده است. بنابراین قابل ملاحظه است که الگوی رفتاری دیوار خاک منجمد از لحاظ اثرگذاری بار ترافیکی بر تغییر مکان جانبی دیوار، حساسیت چندانی به افزایش دما نداشته و کاهش دما به‌صورت جزئی منجر به کاهش تغییر مکان جانبی می‌گردد.



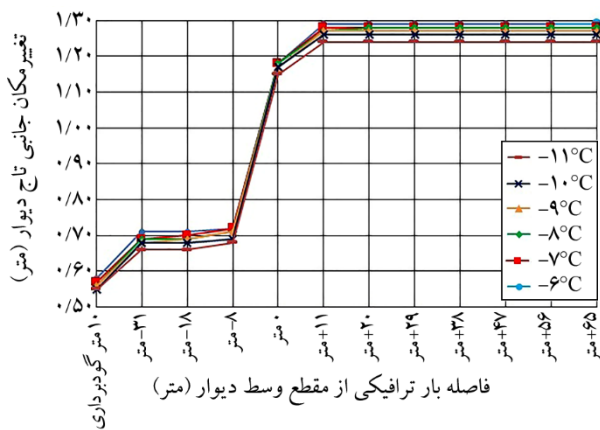
شکل (۱۱): تأثیر عبور بار ترافیکی بر توزیع تغییر مکان جانبی در ارتفاع دیوار خاک منجمد در دمای -2°C در مقطع وسط دیوار و گودبرداری به عمق ۱۰ متر.

شکل (۱۲): تأثیر عبور بار ترافیکی بر توزیع تغییر مکان جانبی در ارتفاع دیوار خاک منجمد در دمای -11°C در مقطع تکیه‌گاه دیوار و گودبرداری به عمق ۱۰ متر.

شکل (۱۲) نیز تأثیر عبور بار ترافیکی بر توزیع تغییر مکان جانبی در ارتفاع دیوار خاک منجمد در دمای -11°C را نشان می‌دهد، با این تفاوت که در این شکل مقطع انتخابی، تکیه‌گاه سمت نزدیک‌تر به محل شروع بار ترافیکی می‌باشد. در این شکل نیز علامت منفی مقابل راهنمای نمودار، نشان‌دهنده‌ی فواصل قبل از رسیدن به مقطع انتخابی دیوار و علامت مثبت نیز فواصل پس از عبور از مقطع انتخابی را نشان می‌دهد. هدف از ارائه این نگاره بررسی مقاطع مختلف دیوار خاک منجمد می‌باشد؛ زیرا به نظر می‌رسد با توجه به وجود اصطکاک در وجه مشترک ضخامت دیوار خاک منجمد با خاک غیر منجمد، تغییر مکان در محل تکیه‌گاه کمتر باشد. مطابق این شکل در تراز سطح زمین، گودبرداری به عمق ۱۰ متر منجر به ۵۵ سانتی متر تغییر مکان جانبی تاج دیوار شده است. با شروع بار ترافیکی از فاصله ۳۱ متر

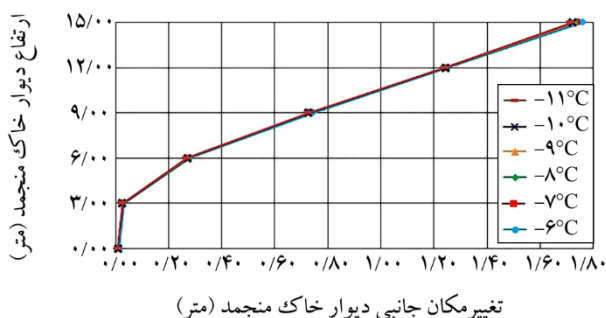
۲-۴- بررسی تأثیر کاهش دما بر پایداری سازه‌ای دیوار خاک منجمد تحت بار ترافیکی

با توجه به افزایش قابل توجه مقاومت برشی خاک منجمد در اثر کاهش دما، انتظار می‌رود که این افزایش مقاومت بر نتایج تحلیل مدل عددی بی‌تأثیر نباشد. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) تأثیر بار ترافیکی بر تغییر مکان جانبی تاج دیوار خاک منجمد در طول دیوار در دماهای مختلف (از -6°C تا -11°C) را به ترتیب در وسط و تکیه‌گاه دیوار خاک منجمد نشان می‌دهند. مطابق نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی در شکل (۱۳)، تحت اثر ۱۰ متر گودبرداری، تغییر مکان جانبی بزرگی به سمت گود



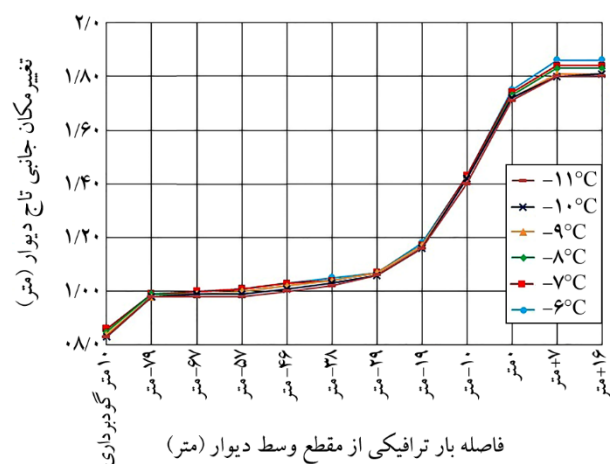
شکل (۱۴): تأثیر کاهش دما بر تغییر مکان جانبی تاج دیوار خاک منجمد تحت فواصل مختلف بار ترافیکی در مقطع تکیه گاه دیوار.

شکل (۱۵) تأثیر کاهش دما بر تغییر مکان جانبی ارتفاع دیوار خاک منجمد در مقطع وسط دیوار و در حالتی که بار ترافیکی درست در مقابل دیوار قرار دارد را نمایش داده است. کاهش دما از -6°C تا -11°C تقریباً بی تأثیر بوده است و کاهش تغییر مکان در این مورد حتی کمتر از ۱٪ می باشد؛ به طوری که تمامی نمودارها تقریباً بر همدیگر منطبق هستند. شکل (۱۶) نیز تأثیر کاهش دما بر تغییر مکان جانبی ارتفاع دیوار خاک منجمد در مقطع وسط دیوار را نشان می دهد. با این تفاوت که در این شکل فاصله بار ترافیکی ۲۹ متر قبل از مقطع وسط دیوار می باشد. در این شکل تأثیر کاهش دما کمی چشم گیر تر است و به طور میانگین منجر به کاهش ۸ درصدی تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود می گردد. این کاهش در ارتفاع ۹ متر تا ۱۲ متر بیشتر است و به بیش از ۱۳٪ می رسد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با نزدیک شدن بار ترافیکی به مقطع دیوار اثر کاهش دما تقریباً از بین می رود و تأثیر بار ترافیکی از فواصل دورتر با کاهش دما قابل کنترل خواهد بود.



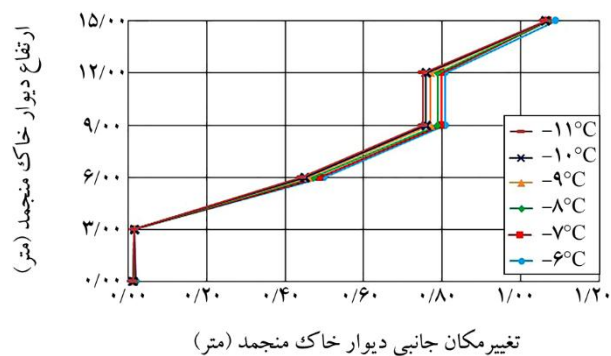
شکل (۱۵): تأثیر کاهش دما بر تغییر مکان جانبی تاج دیوار خاک منجمد تحت فواصل مختلف بار ترافیکی در مقطع تکیه گاه دیوار.

در تاج دیوار رخ می دهد، سپس تا رسیدن بار ترافیکی تا ۱۹ متر قبل از مقطع وسط دیوار، تغییر مکان جانبی نسبتاً کمی به وقوع می پیوندد، آنگاه از ۱۹ متری قبل از دیوار تا ۷ متری پس از آن نیز تغییر مکان جانبی تاج دیوار به سمت داخل گود به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در مقطع وسط دیوار، کاهش دما از -6°C تا -11°C تغییر مکان جانبی تاج دیوار را تا ۳٪ کاهش می دهد که چندان قابل ملاحظه نیست. مطابق شکل (۱۴) که تغییر مکان جانبی تاج دیوار خاک منجمد در مقطع تکیه گاه دیوار تحت تأثیر دماهای مختلف را نشان می دهد، گودبرداری ۱۰ متری منجر به تغییر مکان جانبی تاج دیوار در حدود ۸۰ سانتی متر به سمت گود شده است. پس از آن تا فاصله بار ترافیکی ۸ متر مانده به مقطع دیوار، تغییر مکان جانبی قابل ملاحظه ای رخ نداده است. سپس، از ۸ متر مانده به مقطع دیوار تا ۱۱ متر پس از آن، بار ترافیکی منجر به افزایش قابل توجهی در تغییر مکان جانبی تاج دیوار گردیده است و بعد از عبور بار ترافیکی از ۱۱ متری پس از مقطع مورد نظر دیوار، تغییر مکان جانبی هیچ افزایشی را تجربه نکرده است. در مقطع تکیه گاه دیوار نیز کاهش دما از -6°C تا -11°C تغییر مکان جانبی تاج دیوار را تا ۴٪ کاهش می دهد که این کاهش نیز چندان قابل ملاحظه نیست.



شکل (۱۶): تأثیر کاهش دما بر تغییر مکان جانبی تاج دیوار خاک منجمد تحت فواصل مختلف بار ترافیکی در مقطع وسط دیوار.

برای آن وجود ندارد، با در نظر گرفتن شرایط واقعی ساختگاه (اعم از وزن واحد، میزان رطوبت، نسبت تخلخل و فشار جانبی خاک) بالغ بر ۶۰ آزمایش فشاری سه محوری بر روی نمونه‌های خاک منجمد انجام گرفت. مطابق نتایج آزمایش‌های سه محوری، رفتار نرم‌شونده در تمامی نمونه‌های خاک منجمد به وضوح مشاهده می‌شود و نمودارهای تنش- کرنش یک قله و یک حالت پس ماند از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمایش سه محوری بر روی خاک منجمد نشان می‌دهند که با کاهش دما مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده منجمد به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. از این رو، به وسیله مدل‌سازی آزمایش سه محوری بر روی خاک منجمد در نرم افزار آباکوس، مدل رفتاری موهر- کولمب بر اساس نتایج آزمایشگاهی سه محوری اصلاح و صحت‌سنجی گردید؛ به طوری که قابلیت مدل‌سازی رفتار نرم‌شوندگی الاستوپلاستیک خاک منجمد را داشته باشد. سپس هندسه مدل مربوط به گودبرداری ایستگاه مترو به طول ۱۰۴ متر و عمق ۱۰ متر به روش کند و پوش شبیه‌سازی گردید. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد تحت تأثیر گودبرداری به سمت داخل گود در مقطع وسط دیوار بیشتر از مقطع تکیه‌گاه دیوار بوده و تأثیر عبور بار ترافیکی بر روی مقطع وسط دیوار و افزایش تغییر مکان جانبی آن بیشتر از مقطع تکیه‌گاه دیوار می‌باشد. دلیل این امر وجود اصطکاک در محل تکیه‌گاه دیوار خاک منجمد می‌باشد. بنابراین می‌توان در مقاطع نزدیک به تکیه‌گاه دیوار خاک منجمد از ضخامت کمتر و دمای بیشتر دیوار خاک منجمد بهره گرفت. همچنین قابل ملاحظه است که کاهش دما از 6°C تا 11°C تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد در مقطع تکیه‌گاه ندارد (حدود ۲ تا ۳ درصد)، در حالی که در مقطع وسط دیوار کاهش دما در محدوده مذکور تا حدود ۱۳ درصد منجر به کاهش تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود می‌گردد. در نهایت، استفاده از روش انجماد مصنوعی زمین به همراه مهاربندی درون گود، جهت نگهداری گودبرداری مطالعه حاضر (ایستگاه متروی خط ۲ قطار شهری



شکل (۱۶): تأثیر کاهش دما بر تغییر مکان جانبی تاج دیوار خاک منجمد تحت فواصل مختلف بار ترافیکی در مقطع وسط دیوار.

در نهایت پیشنهاد می‌گردد که در محل تکیه‌گاه دیوار خاک منجمد نسبت به وسط دیوار از ضخامت‌های کمتر و دماهای بیشتر جهت به کارگیری مقرون‌به‌صرفه انجماد مصنوعی زمین، بهره گرفته شود. همچنین در صورت امکان و نبود محدودیت ملک مجاور بهتر است که دیوارهایی به صورت قوسی شکل استفاده شود که بحث و بررسی پیرامون این موضوع خارج از حوصله مطالعه حاضر است. همچنین، به جای کاهش دمای دیوار خاک منجمد در پروژه‌های گودبرداری به روش انجماد مصنوعی زمین که هزینه‌های بیشتری را به پروژه تحمیل می‌نماید، مهاربندی دیوار خاک منجمد نگه‌دارنده گود پیشنهاد می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر عبور بار ترافیکی و کاهش دمای خاک بر پایداری دیوار خاکی منجمد با ضخامت کم مورد بررسی قرار گرفت. هندسه طرح و مشخصات مکانیکی خاک غیر منجمد و خاک منجمد مورد استفاده بر اساس نمونه‌های حاصل از خط ۲ قطار شهری تبریز شبیه‌سازی شده است. به منظور مدل‌سازی عددی، در تمامی مراحل این مطالعه از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. برای مدل‌سازی خاک غیر منجمد، پس از حصول پارامترهای مکانیکی حاصل از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های استحصال شده از گمانه‌ها، از مدل رفتاری موهر- کولمب استفاده گردیده است. از آنجایی که خاک منجمد یک مصالح نامتعارف بوده و مدل رفتاری مناسبی

11. Rupprecht, E. (1979) Application of the ground-freezing method to penetrate a sequence of water-bearing and dry formations-three construction cases. *Engineering Geology*, **13**(1), 541-546.

12. Pimentel, E., Sres, A. and Anagnostou, G. (2007) Modelling of ground freezing in tunneling. *Underground Space, The 4th Dimension of Metropolises, ITA and World Tunnel Congress*, 1, Prague, 331-336.

13. Ziegler, M., Baier, C., Aulbach, B., Hamza, M., Shahien, M. and El-Mossallamy, Y. (2009) Simplified phase change model for artificially frozen ground subject to water seepage. *In Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 562-565.

14. Li, S., Lai, Y., Zhang, M. and Zhang, S. (2006) Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel. *Cold Regions Science and Technology*, **46**(3), 181-191.

15. Frivik, P.E. (1981) State-of-the-art report. Ground freezing: thermal properties, modelling of processes and thermal design. *Engineering Geology*, **18**(1), 115-133.

16. Wei, M. and Chang, X. (2002) Analyses of strength and deformation of an artificially frozen soil wall in underground engineering. *Cold Regions Science and Technology*, **34**(1), 11-17.

17. Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S. and Jardine, R.J. (2009) THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Geotechnique*, **59**(3), 159-171.

18. Yugui, Y., Lai, Y. and Chang, X. (2010) Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*, **64**(1), 39-45.

19. Dall'Amico, M., Endrizzi, S., Gruber, S. and Rigon, R. (2011) A robust and energy-conserving model of freezing variably-saturated soil. *The Cryosphere*, **5**(2), 469-484.

تبریز) که مجاور جریان اصلی بوده و امکان تردد ماشین آلات سنگین نیز منظور گردیده است، توصیه می شود.

مراجع

1. Yamamoto, Y. and Sarah, M.S. (2017) Three-and four-point bending tests on artificial frozen soil samples at temperatures close to 0 C. *Cold Regions Science and Technology*, **134**, 20-32.

2. Esmaeili-Falak, M. (2017) Experimental investigation of stress and strain characteristics of frozen sandy soils-A case study of Tabriz subway. *Modares Civil Engineering journal*, **17**(5), 13-24.

3. Zhang, Z., Hong, Z., Wenjie, F., Zhongqiong, Z. and Donghui X. (2016) A spherical template indenter for a frozen soil long-term shear strength test. *Cold Regions Science and Technology*, **131**, 10-15.

4. Esmaeili-Falak, M. (2017) *Effect of System's Geometry on the Stability of Frozen Wall in Excavation of Saturated Granular Soils*. Doctoral dissertation, University of Tabriz.

5. Chamberlain, E.J. (1981) Over-consolidation effects of ground freezing. *Engineering Geology*, **18**(1), 97-110.

6. Jones, J.S. (1981) State-of-the-art report-Engineering practice in artificial ground freezing. *Engineering Geology*, **18**(1), 313-326.

7. Shuster, J.A. (1981) Engineering quality assurance for construction ground freezing. *Engineering Geology*, **18**(1), 333-350.

8. Esmaeili-Falak, M., Katebi, H. and Javadi, A. (2018) Experimental Study of the Mechanical Behavior of Frozen Soils-A Case Study of Tabriz Subway. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **62**(1), 117-125.

9. Kirsch, F., and Richter, Th. (2009) Ground freezing for tunneling under historical structures. *Proceedings 17th ICSMGE*, Alexandria, Egypt.

10. Zhou, M.S.M.M. (2013) *Computational Simulation of Soil Freezing: Multiphase Modeling and Strength Upscaling*. Doctoral Dissertation, Ruhr University Bochum.

- freezing soil. *Cold Regions Science and Technology*, **54**(1), 19-35.
31. Wen, Z., Sheng, Y., Jin, H., Li, S., Li, G. and Niu, Y. (2010) Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground. *Cold Regions Science and Technology*, **64**(3), 248-255.
32. Lai, Y., Pei, W., Zhang, M. and Zhou, J. (2014) Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **78**, 805-819.
33. Vitel, M., Rouabhi, A., Tijani, M. and Guérin, F. (2015) Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities. *Computers and Geotechnics*, **63**, 99-111.
34. Li, Q., Ling, X. and Sheng, D. (2016) Elasto-plastic behaviour of frozen soil subjected to long-term low-level repeated loading, Part I: Experimental investigation. *Cold Regions Science and Technology*, **125**, 138-151.
35. Li, Q., Ling, X. and Sheng, D. (2016) Elasto-plastic behaviour of frozen soil subjected to long-term low-level repeated loading, Part II: Constitutive modelling. *Cold Regions Science and Technology*, **122**, 58-70.
36. An, W.D., Wu, Z.W. and Wei Ma. (1990) *Interaction Among Temperature, Moisture and Stress Fields in Frozen Soil*. Lanzhou University Press, Lanzhou.
37. Wang, J.P., Wang, Z.Y. and Wu, Q.J. (1993) Three-dimensional finite element analysis of stress and deformation of frozen wall in deep thick clay layer. *Journal of Glaciology and Geocryology*, **15**(2), 309-316.
38. Potts, D.M. and Lidija, Z. (2001) *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application*. Thomas Telford, 2.
39. Getachew, A. (2003) *Traffic load effects on bridges, statistical analysis of collected and Monte Carlo simulated vehicle data*. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden.
20. Li, D., Fan, J. and Wang, R. (2011) Research on visco-elastic-plastic creep model of artificially frozen soil under high confining pressures. *Cold Regions Science and Technology*, **65**(2), 219-225.
21. Liu, J. and Jun, X. (2012) Nonlinear Analyses for the Permeability Coefficient of Frozen Soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **17**, 3875-3884.
22. Zhou, M. (2013) *Computational Simulation of Soil Freezing: Multiphase Modeling and Strength Upscaling*. Ph.D. Dissertation, Ruhr University Bochum.
23. Yang, W., Lei K. and Chen, Y. (2015) Numerical evaluation on the effects of soil freezing on underground temperature variations of soil around ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, **75**, 259-269.
24. Nassr, A., Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., and Javadi, A. (2018) A new approach to modeling the behavior of frozen soils. *Engineering Geology*, **246**, 82-90.
25. Nassr, A., Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., & Javadi, A. (2018) A new approach to modeling the behavior of frozen soils. *Engineering Geology*, **246**, 82-90.
26. Sayles, F.H., and Haines, D. (1974) Creep of Frozen Silt and Clay. *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*, **CRREL-TR-252**.
27. Ting, John M. (1981) *The Creep of Frozen Sands: Qualitative and Quantitative Models*. Massachusetts Inst. of Tech. Cambridge Dept. of Civil Engineering, **R81-5**.
28. Williams, P. (1964) Unfrozen water content of frozen soils and soil moisture suction. *Geotechnique*, **14**(3), 231-246.
29. Li, N., Chen, B., Chen, F. and Xu, X. (2000) The coupled heat-moisture-mechanic model of the frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*, **31**(3), 199-205.
30. Li, N., Chen, F., Xu, B. and Swoboda, G. (2008) Theoretical modeling framework for an unsaturated

واژه‌نامه

Peak	۱- قله
Residual	۲- پس ماند
Swansea	۳- سوانسی
South Wales	۴- ولز جنوبی
Mohr-Coulomb	۵- موهر - کولمب
ABAQUS	۶- آباکوس
Hex-Dominated Elements	۷- المان‌های شش وجهی

The Effect of Traffic Load Excavation Supported by Artificial Ground Freezing: A Case Study of Tabriz Subway

Mahzad Esmaeili-Falak¹ and Hooshang Katebi^{2*}

1. Ph.D. Candidate in Geotechnical Eng., Faculty of Civil Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Associate Professor, Geotechnical Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran,
* Corresponding Author, email: Katebi@tabrizu.ac.ir

In this study, the impact of passing traffic and temperature reduction on the stability of the frozen soil wall is studied. Design geometry and mechanical properties of the frozen and unfrozen soil have been simulated according to the line 2 of Tabriz Subway. In order to numerical modeling, in all stages of the present study, the ABAQUS finite element software has been used. For modeling of unfrozen soil, mechanical properties resulted from experimental tests on the samples obtained from boreholes, then the Mohr-Coulomb constitutive model has been used. Since the frozen soil is an unconventional material, there is no reasonable constitutive model for that. Taking into account the actual site conditions (including unit weight, water content, void ratio and lateral earth pressure), more than 60 triaxial compressive tests were conducted on the frozen soil samples. Results from triaxial tests on the frozen soils showed that shear strength of frozen poorly graded sand increases with temperature reduction. Thus, by modeling the triaxial test on frozen soil in ABAQUS software, Mohr-Coulomb constitutive model was verified according to the experimental results of triaxial tests, so that it can model the strain-softening elasto-plastic behavior of frozen sand. The geometry of metro station excavation with the length of 104 m and the depth of 10 m was simulated according to the cut and cover method, consequently. Analysis results showed that lateral displacement of the frozen soil wall into the excavation due to the cut at middle section of the wall is greater than the supports section. Besides, the effect of passing traffic load on the middle section of the frozen soil wall is greater and it leads to larger lateral displacement into the excavation in this section. The reason of this fact is the friction between unfrozen and frozen soil at the place of abutments. Therefore, in close section to abutments of frozen soil wall, thin and warmer (subzero) temperatures can be used. It is worth mentioning that the decrease in temperature has no significant effects on lateral displacement reduction of the frozen soil wall at abutments (about 2-3%), while, this value is up to 13% at the middle of the frozen soil wall. Eventually, the method of artificial ground freezing for supporting the excavations in this study (subway station of line 2, Tabriz subway) is recommended, which is adjacent to the main road and heavy vehicles traffic is possible.

Keywords: Artificial Ground Freezing (AGF), Finite Element Method (FEM), Triaxial Compressive Test, Traffic Load, Tabriz Subway.