

مطالعه‌ی امکان‌سنجی استفاده از دیوار خاکی منجمد جهت نگهداری گودها (مطالعه‌ی موردی: قطار شهری تبریز)

مهزاد اسمعیلی فلک (دانشجوی دکتری)

هوشنگ کانی* (دانشیار)

سعید رحیمی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۸)
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۱/۲، ص. ۱۰۳-۹۳، (پادداشت نمی)

روش انجماد مصنوعی زمین، روشی پیشرفته و دوستدار محیط زیست جهت بهسازی و نگهداری موقتی توده‌ی خاک است. نوشتار حاضر، ملاحظات کلی طراحی مکانیکی روش انجماد مصنوعی زمین را در بر می‌گیرد و درکی از سیستم‌های تکیه‌گاه موقتی ارائه می‌کند. با استفاده از مدل رفتاری موهر - کولمب اصلاح شده به شبیه‌سازی سه بعدی اجزاء محدود دیوار خاکی منجمد و بررسی پارامتری آن، اعم از: عمق گودبرداری، دمای انجماد و مقدار سربار در قالب یک مطالعه‌ی موردی مربوط به خط دو متروی شهر تبریز پرداخته شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر مدل‌سازی عددی، یک مدل‌سازی فیزیکی آزمایشگاهی پس از اعمال شرایط مرزی و تحلیل ابعادی صحیح انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که دیوار خاک منجمد در ناحیه‌ی مقاوم، تغییرشکل زیادی ندارد و پس از آن به دلیل حذف فشار جانبی مقاوم، نرخ تغییرمکان نسبی افزایش می‌یابد. سازه‌های خاک منجمد، قابلیت تغییرشکل بسیار بالایی دارند و در صورت تحلیل و طراحی صحیح، دچار گسیختگی ترد سازه‌یی نخواهند شد. همچنین بهتر است در ضخامت‌های کم از مهارهای پشت‌بنددار برای کنترل تغییرمکان استفاده کرد.

واژگان کلیدی: انجماد مصنوعی خاک، روش اجزاء محدود، آزمایش فشار

سه محوری، متروی تبریز.

mahzad.ef@tabrizu.ac.ir
katebi@tabrizu.ac.ir
saeed.rahimi@tabrizu.ac.ir

۱. مقدمه

انواع خاک‌های همگن، سست و نرم، دوستدار محیط زیست است و هیچ ماده‌ی شیمیایی وارد محیط زیست نمی‌کند و در حین و پس از اجرا، بافت طبیعی خاک را بر هم نمی‌زند و هیچ مشکلی برای آب زیرزمینی از لحاظ برگشت‌پذیری ایجاد نمی‌کند.

خروج مصنوعی گرما، خاک را به طور موقت و به صورت درجا منجمد و آن را به عنوان یک المان تکیه‌گاهی استاتیکی مطرح می‌کند. پس از بسته شدن بدنه‌ی خاک منجمد، یک محیط آب‌بند فراهم و مانع از جریان آب زیرزمینی می‌شود. همچنین انجماد مصنوعی خاک منجر به افزایش قابل توجه مقاومت برشی و فشاری آن می‌شود. در سال‌های اخیر، انجماد مصنوعی زمین نه فقط برای تونل‌ها، بلکه برای ساخت طبقات زیرزمین نیز استفاده می‌شود. [۱-۱۱]

در سال‌های پیشین، هزینه‌های بالای روش انجماد مصنوعی زمین مانع از اجرای آن در تمامی پروژه‌ها می‌شد، ولی با این حال مزایای فنی آن در مقابل هزینه‌های بالا، استفاده از آن را توجیه می‌کرد. اما امروزه طراحی‌های سازه‌یی دقیق‌تر و شناخت کامل‌تر رفتار خاک‌های منجمد منجر به طراحی‌های ظریف‌تری می‌شوند که مدت

با رشد روزافزون جمعیت در کلان‌شهر تبریز، تقاضا برای سامانه‌ی حمل و نقل زیرزمینی افزایش یافته است. از آنجایی که فضای ساخت و ساز زیرزمینی محدود و حفاری در زمین همواره با مشکلاتی روبرو بوده است، روش‌های مختلفی به عنوان سیستم تکیه‌گاهی در زمین استفاده می‌شوند، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به انواع تزریق‌ها، میخ‌کوبی و تسلیخ خاک، دیوار دیافراگمی، شمع‌کوبی و سپرکوبی اشاره کرد. اما هر یک از روش‌های مذکور معایبی دارند که استفاده از آن‌ها را محدود می‌کنند. به عنوان مثال، مشکل حضور آب زیرزمینی، وارد کردن مواد شیمیایی به خاک، برهم زدن بافت طبیعی خاک و هزینه‌ی بالا را می‌توان از مشکلات به کارگیری آن‌ها نام برد. این تذکر لازم است که هر یک از روش‌های ذکر شده در محدوده‌ی خاصی از توزیع اندازه‌ی ذرات خاک و نوع خاک‌ها قابل استفاده هستند. اما در این میان، روشی با نام انجماد مصنوعی وجود دارد که علاوه بر قابلیت استفاده در تمامی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۳/۷، پذیرش ۱۳۹۶/۳/۲۰.

DOI:10.24200/J30.2018.1949.2029

زمان انجماد و در نتیجه هزینه‌ها را به شدت کاهش می‌دهند. از طرفی، امروزه پیمانکاران انجماد کار وجود دارند که در بلندمدت مشکلی از بابت بازگشت سرمایه نخواهند داشت. بنابراین می‌توان روش انجماد مصنوعی زمین را جزء روش‌های اقتصادی و مقرون به صرفه جهت بهسازی موقت خاک معرفی کرد. [۱۲-۱۴]

نوشتار حاضر ملاحظات کلی طراحی مکانیکی و سازه‌ی روش انجماد مصنوعی زمین را در بر می‌گیرد. هدف از مطالعه‌ی حاضر، فراهم کردن درکی از سیستم‌های تکیه‌گاه موقتی خاک منجمد برای گودبرداری‌هایی همچون ایستگاه‌های مترو است. در مطالعه‌ی حاضر، آثار کاهش دما، اثر سربار و نیز عملیات گودبرداری بر پایداری سازه‌ی دیوار خاک منجمد ایستگاه مترو در قسمت مرکزی خط ۲ قطار شهری تبریز بررسی شده‌اند و سعی شده است تا از تحلیل و طراحی دیوارهای خاکی منجمد ظرفیت‌تر و سبک‌تر استفاده شود تا روش انجماد مصنوعی به عنوان یک تکنولوژی مقرون به صرفه مقبول واقع شود. به عبارتی دیگر، در نوشتار حاضر بر قابلیت تغییر شکل‌پذیری سازه‌ی خاک منجمد بدون استفاده از المان‌هایی چون مهارها و پشت‌بندها تکیه شده است.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

از آنجایی که مطالعات مختصری در رابطه با شبیه‌سازی سه‌بعدی دیوار خاک منجمد انجام شده است، از این رو گزیده‌ی از مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی تکنولوژی انجماد مصنوعی زمین در ادامه ارائه شده است. علم رفتار تنش - کرنش خاک منجمد و مدل‌سازی عددی آن در رابطه با انجماد مصنوعی زمین، برای مهندسان ژئوتکنیک، اهمیت بسیاری دارد. خاک منجمد یک سیستم چندفازی پیچیده‌ی متشکل از خاک، یخ، آب غیرمنجمد و هواست که عمدتاً در تحلیل‌های عددی، ساده‌سازی‌هایی به منظور کاهش فازهای تشکیل‌دهنده انجام می‌شود؛ به عنوان مثال خاک اشباع در نظر گرفته می‌شود. [۱۵] اولین کاربرد ثبت‌شده‌ی روش انجماد مصنوعی زمین بر روی یک پروژه‌ی شافت معدنی در سال ۱۸۶۲ انجام شد. [۱۶] هر چند در طی سال‌های اخیر، مطالعاتی بر روی خواص مکانیکی خاک‌های منجمد و شبیه‌سازی عددی انجماد مصنوعی زمین انجام شده‌اند، [۱۷-۲۸] اما در مقایسه با خاک‌های غیرمنجمد، هنوز جای کار بسیاری وجود دارد.

برخی پژوهشگران تأکید کرده‌اند که مقاومت خاک منجمد به چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی آن بستگی دارد. مؤلفه‌ی چسبندگی به ماتریس یخ نسبت داده شده است که به مقدار، مقاومت یخ، و ناحیه‌ی تماس بین یخ و خاک بستگی دارد که هر کدام تابعی از دما هستند. [۲۹، ۳۰] اما برخلاف نظریه‌ی ذکرشده، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حتی در دماهای پایین‌تر از صفر درجه و بدون حضور هیچ‌گونه آلاینده‌ی، مقداری آب غیرمنجمد در خاک منجمد باقی می‌ماند و به صورت نواری باریک، پیرامون ذرات خاک را احاطه می‌کند و مانع از تماس مستقیم و اندرکنش خاک و ماتریس یخ می‌شود. [۳۱، ۳۲]

پرواضح است که در فشار محدودکننده‌ی ثابت، مقاومت برشی نمونه با کاهش دما افزایش می‌یابد. پیرامون مسائل انتقال حرارت در خاک منجمد، یک مدل تغییر فاز ساده در سال ۲۰۰۵ به منظور شبیه‌سازی انجماد در خاک کاملاً اشباع ارائه و در نهایت، کارایی مدل پیشنهادی تأیید شده است. [۳۳] با تحلیل نتایج آزمایش‌های سه‌محوری خاک منجمد و ترسیم خطوط جریان و خطوط پتانسیل، در پژوهشی در سال ۲۰۰۸، یک سطح پتانسیل خمیری بیضی مطابق اصل دراگر و قانون جریان

خمیری همراه پیشنهاد شده است که مطابقت بسیار خوبی با نتایج و رفتار مشاهده شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد. [۳۴] همچنین، در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۲، سه پروژه متروی شهری توسط کد اجزاء محدود FREEZE توسط تحلیل کوپلی حرارتی - هیدرولیکی اجرا شد، که نشان می‌دهد کد FREEZE ابزاری قدرتمند جهت تحلیل و طراحی انجماد مصنوعی زمین است. [۳۵]

در نهایت، در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۳، [۳۶] رفتار مکانیکی خاک منجمد توسط یک مدل رفتاری الاستوخمیری براساس BBM^۱ مدل‌سازی شد که دلیل انتخاب آن، یک سیستم چهارفازی خاک منجمد بود و از آنجایی که BBM به منظور مدل‌سازی خاک‌های غیراشباع توسعه یافته است، پژوهش مذکور قابل اعتماد به نظر می‌رسد. به منظور تشریح رفتار تغییرشکل الاستوخمیری خاک منجمد نیز مجموعه‌ی از آزمایش‌های فشار سه‌محوری انجام و یک مدل رفتاری برای مصالح خاک منجمد در سال ۲۰۱۴ ارائه و مشخص شد که مدل ارائه‌شده به خوبی می‌تواند مشخصه‌های تغییرشکلی خاک منجمد را پیش‌بینی کند. [۳۷] بررسی‌ها نشان می‌دهند که مطالعات اخیر در رابطه با مدل رفتاری خاک منجمد بر استفاده از مدل‌های الاستوخمیری و هاپرکشنان تأکید دارند. [۳۸، ۳۹] همچنین، طی مطالعاتی به تازگی رفتار دینامیکی و سیکلی خاک‌های منجمد نیز بررسی و نتایج درخور توجهی ارائه شده است. [۴۰، ۴۱]

نوشتار حاضر، ملاحظات طراحی مکانیکی روش انجماد مصنوعی زمین را در بر می‌گیرد؛ به طوری که تأثیر دما در پایداری سازه‌ی (نه هندسی) دیواره‌ی منجمد خاکی تحت سربارهای مختلف و ترازهای مختلف گودبرداری را بررسی کرده است. اهداف اصلی نوشتار حاضر، بررسی قابلیت استفاده از مدل رفتاری موهر - کولمب اصلاح‌شده براساس نتایج آزمایش‌های سه‌محوری انجام‌شده در پژوهش حاضر و نیز حصول درکی از تأثیر گودبرداری در دماها و سربارهای مختلف (و بدون سربار) در پایداری سیستم تکیه‌گاه موقتی خاک منجمد برای گودبرداری‌های روبازی همچون حفاری ایستگاه‌های مترو به روش کُند و پوش هستند.

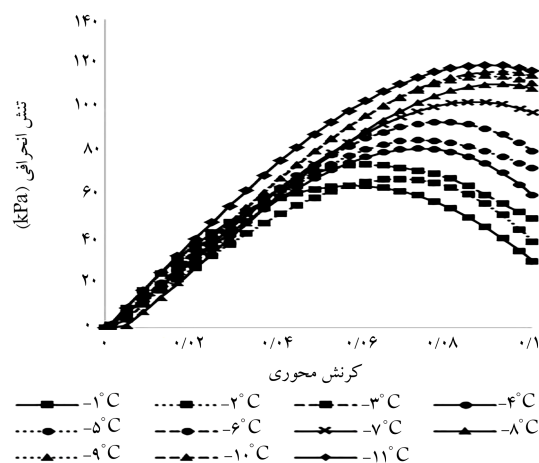
۳. بررسی آزمایشگاهی رفتار خاک منجمد و پارامترهای

مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

پیش از استفاده از انجماد مصنوعی خاک و شبیه‌سازی عددی آن، آگاهی از علم خواص مکانیکی خاک منجمد ضروری است. تمامی پارامترهای مکانیکی خاک منجمد و رفتار آن در شبیه‌سازی عددی، مستقلاً با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده‌اند. به منظور حصول خواص مکانیکی و رفتار الاستوخمیری خاک منجمد مورد مطالعه، دستگاه فشاری سه‌محوری برای خاک‌های منجمد در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد که تصویر آن به صورت شماتیک در شکل ۱ مشاهده می‌شود. دلیل ساخت دستگاه فشاری سه‌محوری انجماد این است که دستگاه آزمایش فشاری سه‌محوری، یک دستگاه متعارف نیست و به راحتی خریداری نمی‌شود. این تذکر لازم است که حق مالکیت انحصاری دستگاه فشاری سه‌محوری برای خاک‌های منجمد به عنوان اختراع در سازمان ثبت اسناد و املاک کشور (مرکز مالکیت معنوی) ثبت شده است. نمونه‌های مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، خاک ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده‌ی بازسازی‌شده مطابق گمانه‌های L۲W۷ و L۲W۴ ساختگاه خط ۲ قطار شهری تبریز هستند. مقطع عرضی زمین‌شناسی محل استحصال گمانه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن ایستگاه مترو عمود بر مقطع و محور طولی ایستگاه‌ها در امتداد گمانه‌های مذکور است.



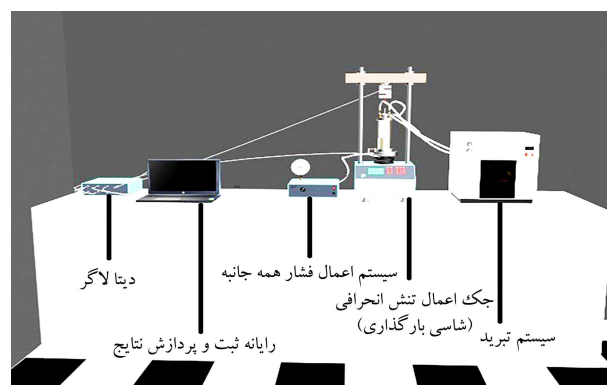
شکل ۴. تصویر قالب عمل آوری نمونه های آزمایش قبل از انتقال به دستگاه انجماد.



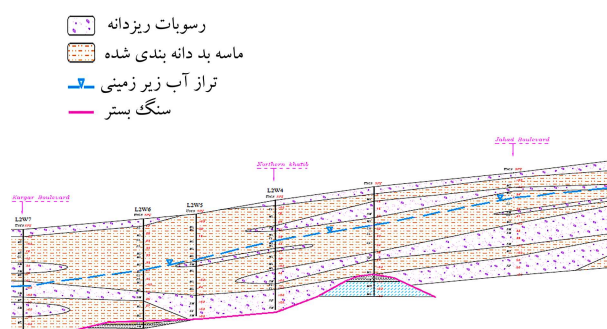
شکل ۵. تأثیر دما در رفتار تنش - کرنش ماسه ی منجمد تحت تنش محدودکننده ی ۱۰۰ کیلوپاسکال.

انجماد به صورت شعاعی در پیرامون لوله ی انجماد توسعه می یابد، با الگوبرداری از فرایند مذکور، نمونه ها مطابق روابط وزنی - حجمی پس از بازسازی و اشباع سازی با تداخل یکسان، داخل قالب های مخصوصی قرار گرفتند که از بالا و پایین توسط فوم پلی یورتان عایق بندی و از بدنه ی آلومینیومی با هدایت حرارتی بالایی ساخته شده بودند (شکل ۴) مجموعه ی مطرح شده با شرایط مذکور به محفظه ی انجماد منتقل شدند. هدف استفاده از قالب های مخصوص، انتشار جبهه ی انجماد در جهت شعاعی و عدم تشکیل لنت های یخی و ناهمگنی در نمونه های منجمد بود. این تذکر لازم است که ۵٪ نمونه های ساخته شده به منظور بررسی عدم تشکیل لنت های یخی و ناهمگنی، شکافته و بازرسی شدند.

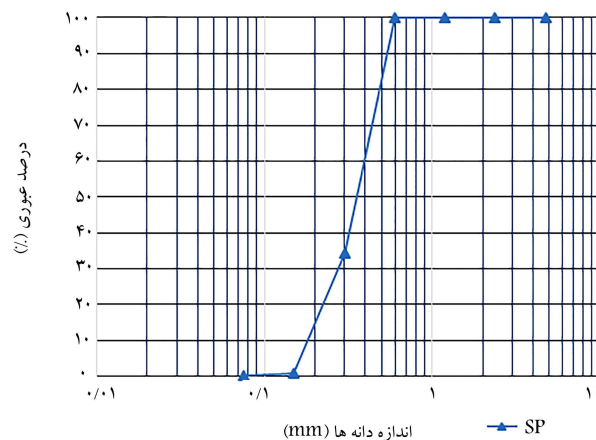
میانگین محدودکنندگی مربوط به هر تراز در ارتفاع دیواره ی ایستگاه مترو در آزمایش ها مدنظر قرار گرفته است. مطابق نتایج آزمایش های سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده بر روی نمونه های ماسه ی بدانه بندی شده ی منجمد، رفتار نرم شونده در تمامی نمونه های خاک منجمد به وضوح مشاهده می شود و نمودارهای تنش - کرنش، یک قله ۲ و یک حالت پس ماند ۳ از خود نشان می دهند. با در نظر گرفتن قله ی مذکور به عنوان مقاومت برش خاک منجمد، مشاهده می شود که با کاهش دما، مقاومت برشی خاک ماسه یی بدانه بندی شده ی منجمد به طور قابل ملاحظه یی افزایش می یابد. گزیده یی از نتایج آزمایش های سه محوری انجام شده بر روی خاک منجمد در مطالعه ی حاضر، در قالب نمودار تنش - کرنش برای دماهای مختلف زیر صفر و تنش محدودکننده ی ۱۰۰ KPa در شکل ۵ نشان داده شده اند. با توجه به اینکه آزمایش های سه محوری به صورت تحکیم نیافته ی



شکل ۱. شکل شماتیک دستگاه آزمایش فشاری سه محوری خاک های منجمد دانشگاه تبریز.



شکل ۲. مقطع عرضی زمین شناسی خط ۲ قطار شهری تبریز در محدوده ی مورد مطالعه.



شکل ۳. منحنی دانه بندی خاک منجمد مورد استفاده در مطالعه های عددی و آزمایشگاهی.

منحنی دانه بندی و مشخصات خاک مورد مطالعه به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۱ نشان داده شده اند. به منظور بررسی تأثیر دما در پارامترهای مکانیکی خاک منجمد مطابق با شرایط ساختگاه، آزمون های سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده (UU) بر روی نمونه ها انجام شد. از آنجایی که مصالح مورد استفاده خاک منجمد، مشابه خاک های سیمانی است و البته شکل پذیرتر از آنها رفتار می کند و فقط خاک دانه یی نیست، به منظور مدل سازی شرایط دقیق ساختگاه از آزمایش UU استفاده شده است.

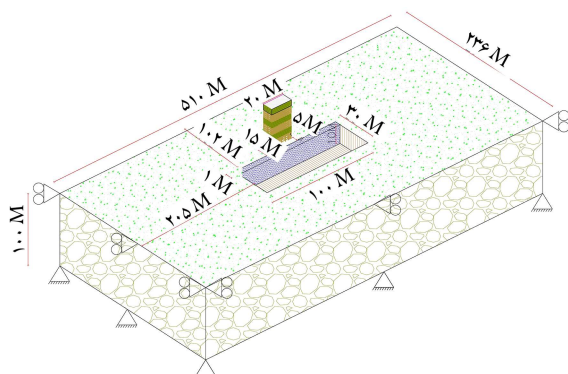
با توجه به اینکه روش انجماد خاک در ساختگاه به ترتیبی است که جبهه ی

جدول ۱. خواص مکانیکی خاک غیرمنجمد.

v	$E(KPa)$	C_c	C_u	$C\&M(\%)$	$S(\%)$	$G(\%)$	$\Phi(^{\circ})$	γ_{sat} (KN/m^3)	G_s	soil Classification
۰٫۳	۴۰۰۰۰	۱٫۰۴	۲٫۱۷	۱٫۲	۹۸٫۸	صفر	۳۳	۱۹٫۱	۲٫۶۳۵	SP

جدول ۲. خواص و پارامترهای ورودی مدل برای خاک منجمد.

دما ($^{\circ}C$)	$\phi(^{\circ})$	مقاومت برشی (KPa)	v	$E(KPa)$
-۶	صفر	۴۵۲۶٫۲۸	۰٫۳۵۲	۱۳۹۰۲۴٫۲
-۷	صفر	۴۷۷۶٫۱۶	۰٫۳۴۴	۱۴۵۴۰۴٫۵
-۸	صفر	۵۱۵۱٫۸۹	۰٫۳۳۶	۱۵۶۹۶۷٫۶
-۹	صفر	۵۲۹۲٫۶	۰٫۳۲۸	۱۶۱۶۹۱٫۸
-۱۰	صفر	۵۴۲۲٫۸۶	۰٫۳۲	۱۶۸۳۰۴٫۷
-۱۱	صفر	۵۵۶۳	۰٫۳۱۲	۱۷۴۹۵۳٫۹



شکل ۶. شکل شماتیک هندسه‌ی مدل‌سازی عددی.

ورودی بیشتر و در نتیجه انجام آزمایش‌های مضاعف و غیرمتعارف‌تر خواهد بود. از طرفی فرایند تحلیل‌ها زمان‌بر، پیچیده و پرهزینه می‌شود. در طرف مقابل، مدل رفتاری با دقت پایین و بسیار ساده شده ممکن است اصول فنی تحلیل و طراحی را رعایت نکند و به نتایج غیرواقعی منجر شود که استفاده از آن را ناممکن می‌سازد. در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به پیچیدگی‌های موجود در رفتار خاک منجمد با صرف‌نظر از تغییرات نرخ دما (ثابت نگه داشتن انتقال حرارت بین وجه مشترک مصالح) به اصلاح مدل رفتاری موهر - کلمب^۴ براساس نتایج آزمایش‌های سه‌محوری انجام شده بر روی خاک منجمد در آزمایشگاه پرداخته شده است؛ به طوری که بدون نیاز به پارامترهای ورودی بیشتر و پیچیده‌تر، این مدل قابلیت مدل‌سازی نرم‌شوندگی رفتار الاستوخمیری خاک منجمد را داشته باشد. با توجه به اینکه در مدل‌سازی عددی، فرایند پس از انجماد مدل شده است و نتایج آزمایش سه‌محوری مورد استفاده دقیقاً بر نتایج مدل عددی برازش شده‌اند، از تأثیر افزایش حجم آب پس از انجماد در رفتار مکانیکی خاک منجمد با دقت قابل قبولی صرف‌نظر شده است.

براساس تحلیل حساسیت انجام شده به منظور جلوگیری از اثرگذاری شرایط مرزی در نتایج تحلیل، ابعاد هندسی مدل اجزاء محدود سه‌بعدی $510\text{ m} \times 236\text{ m} \times 100\text{ m}$ به دست آمده است که دیوار منجمد خاکی به طول 102 m متر در آن مدل‌سازی شده است. انتخاب شکل المان‌ها و اندازه‌ی آن‌ها عمدتاً به هندسه‌ی مدل و نوع تحلیل مورد نیاز بستگی دارد. در مسائل ژئوتکنیکی، المان‌ها باید به گونه‌ی انتخاب شوند که بتوانند چگونگی تغییر هندسه در طول تحلیل را به خوبی مدل‌سازی کنند. از طرفی روابط اجزاء محدود برای المان‌های شش‌وجهی^۵ برای فرموله شدن مقداری راحت‌تر هستند.^[۴۴] بنابراین در مطالعه‌ی حاضر برای شبکه‌بندی مدل از المان‌های شش‌وجهی استفاده شده است. با استفاده از ابزار دانه‌بندی و پارتیشن‌بندی، چگالی مش در ناحیه‌ی گودبرداری افزایش یافته است تا تحلیل نتایج با دقت بالایی انجام شود. شکل ۶، تصویر شماتیک هندسه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد، که در آن تمامی اندازه‌های لازم نشان داده شده‌اند. در تمامی تحلیل‌ها، ضخامت دیوار خاک منجمد ۱ متر و ارتفاع آن ۱۵ متر در نظر گرفته شده است. متغیرهای مربوط به تحلیل عددی عبارت‌اند از ۴ سربار

زهکشی نشده انجام شده‌اند، مقاومت برشی زهکشی نشده برای تمام نمونه‌ها به دست آمده و زاویه‌ی اصطکاک داخلی صفر منظور شده است. نتایج کثی حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی به عنوان پارامترهای ورودی تحلیل عددی در بخش بعدی استفاده شده است.

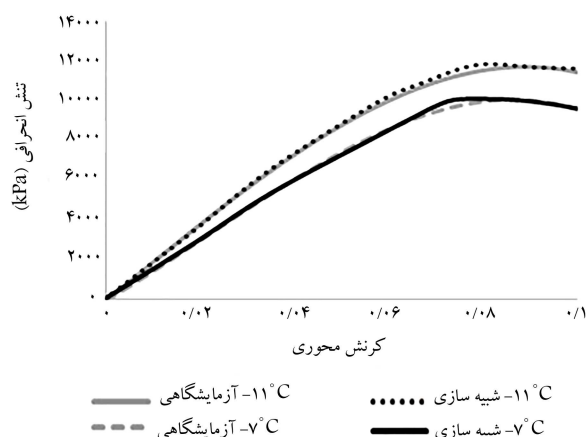
در تمامی آزمایش‌های سه‌محوری، گسیختگی‌ها به صورت شکل‌پذیر به وقوع پیوستند به طوری که با وجود ادامه‌ی آزمایش‌های سه‌محوری تا کرنش 20% ، حتی در یک آزمایش نیز گسیختگی ترد مشاهده نشد و گسیختگی در نمونه‌ها به صورت شکم‌دادگی و کوتاه شدن ارتفاع نمونه نمود پیدا می‌کرد. برای حصول نسبت بواسون در دماهای مختلف برای خاک مورد استفاده، از روابط پیشنهادی برخی پژوهشگران (۱۹۹۰ و ۱۹۹۳) به صورت رابطه‌ی ۱ استفاده شده است.^[۴۳،۴۲]

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

پارامترهای ورودی خاک منجمد برای هر دمای مدل عددی نیز در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور محاسبه‌ی مدول کشسانی خاک منجمد نیز با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش سه‌محوری، شیب قسمت خطی نمودار تنش - کرنش مدنظر قرار گرفته است.

۴. مدل‌سازی عددی

در مطالعه‌ی حاضر از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS ۶٫۱۴-۳ به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی دیوار خاکی منجمد و بررسی رفتار آن تحت دماهای مختلف استفاده شده است. انتخاب مدل رفتاری مناسب به منظور شبیه‌سازی رفتار مصالح خاکی، مهم‌ترین بخش و ابتدایی‌ترین قسمت حل مسائل به صورت عددی است. رفتار خاک منجمد غیرخطی است و 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. همواره باید یک تعادل بین دقت و عملی بودن مدل رفتاری برقرار باشد. مدل رفتاری بسیار پیچیده با دقت بسیار بالا همواره اقبال مناسبی از طرف سایر پژوهشگران و طراحان ندارد. چرا که استفاده از آن مستلزم پارامترهای



شکل ۸. نمونه نمودارهای تنش - کرنش حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزاء محدود.

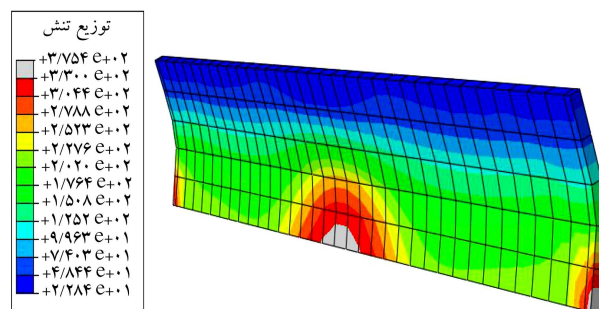
به صورت گام به گام کرنش کنترل، کرنش و تنش در هر گام ثبت، و نمودار تنش - کرنش ترسیم شده است. با در نظر گرفتن منحنی تنش - کرنش حاصل از آزمایش سه محوری انجام گرفته بر روی مصالح دیوار خاک منجمد، به ارزیابی مدل رفتاری مورد استفاده در مطالعه حاضر پرداخته شده است. روش کار به این صورت است که با کمک چند پارامتر به دست آمده توسط آزمایش‌های سه محوری انجام شده در آزمایشگاه و به کمک روش سعی و خطا، پارامترهای مجهول در محدوده مناسب در مدل ساخته شده امتحان و نمودارهای تنش - کرنش هر مدل با پارامترهای مختلف رسم می‌شوند. از آنجایی که خاک منجمد یک مصالح غیرمتعارف است و شرایط بسیار زیادی نتایج آزمایش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بهتر است که پیش از مدل‌سازی عددی، قطعاً آزمایش‌های سه محوری جهت شناخت رفتار خاک منجمد مربوط انجام شود.

در پایان نمودارهای به دست آمده از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه و پارامترهای مربوط به نمودار نزدیک‌تر به نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی به عنوان پارامترهای مدل رفتاری انتخاب شده‌اند. به عنوان نمونه در شکل ۸، نمودارهای تنش - کرنش حاصل از انجام آزمایش سه محوری تحت دماهای -7°C و -11°C - بر روی مصالح دیوار خاک منجمد و نتایج حاصل از روش اجزاء محدود به کمک مدل رفتاری موهر - کولمب اصلاح شده نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل مذکور ملاحظه می‌شود، مدل رفتاری موهر - کولمب اصلاح شده، رفتار غیرخطی و نرم‌شوندگی ماسه‌ی بدانه‌بندی‌شده منجمد را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کند که این امر نشان‌دهنده‌ی مطابقت نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی است و صحت نتایج مدل عددی را اثبات می‌کند. مطلب جالب توجه این است که حتی فرم گسیختگی شکل‌پذیر و غیرترد نمونه در انتهای مدل‌سازی نیز مطابق با مشاهده‌های آزمایشگاهی است و در مدل عددی نیز گسیختگی ترد به وقوع نمی‌پیوندد و تغییر شکل شکل‌پذیر مشهود است.

۵. نتایج و بحث

در یک مطالعه‌ی عددی، بررسی تمامی پارامترهای دخیل در مدل عددی غیرمنطقی است. چرا که تعداد تحلیل‌ها به طور نامتعارفی افزایش خواهد یافت به ویژه در مطالعه‌ی حاضر که به دلیل پیچیدگی‌های موجود، تک‌تک تحلیل‌ها زمان بر هستند. از این رو مقرر شد که فقط پارامترهای مهم و تأثیرگذار بررسی شوند. همان‌گونه که در



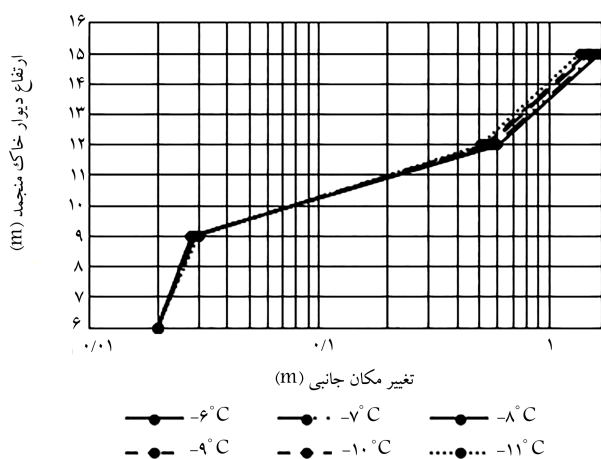
شکل ۷. الگوی توزیع تنش و تغییر شکل دیوار خاکی منجمد -9°C پس از گودبرداری تا عمق ۸ متر و تحت سربار 264 کیلوپاسکال.

مختلف، شامل: حالت‌های بدون سربار (0 kPa)، سربار ساختمان 10° طبقه (117 kPa)، سربار ساختمان 15 طبقه (195 kPa) و سربار ساختمان 20 طبقه (264 kPa). همچنین تأثیر گودبرداری در اعماق 2 ، 4 ، 6 ، 8 و 10 متر از سطح زمین و نیز دمای دیوار خاک منجمد در دماهای -6°C تا -11°C بوده است.

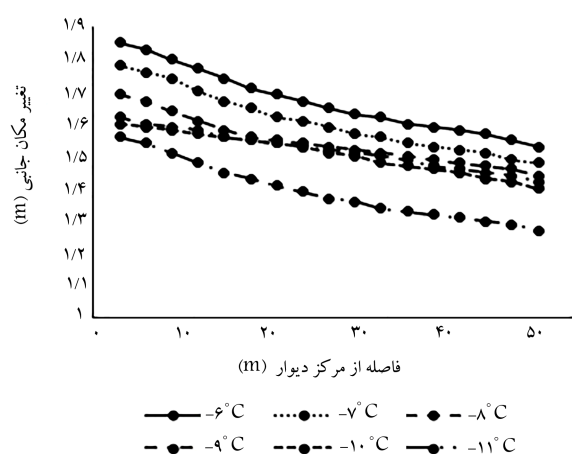
شبیه‌سازی مدل عددی در ۷ گام انجام می‌شود که در گام اول، گرانش؛ در گام دوم، سربار و به ازاء هر یک از گام‌های ۳ الی ۷، نیز ۲ متر گودبرداری منظور می‌شود که در مجموع به عمق 10 متری می‌رسند. نحوه‌ی مدل‌سازی هر گام گودبرداری به ترتیبی انجام می‌شود که با حذف کف گود به عمق 2 متر، تأثیر نیروی گرانشی و جانبی قسمت حذف شده خنثی شود. شکل ۷، تصویر تغییر شکل یافته و الگوی توزیع تنش در دیوار خاک منجمد در دمای -9°C پس از اعمال سربار ساختمان 20 طبقه و ۸ متر گودبرداری را در محیط نرم‌افزار نشان می‌دهد.

۱.۴. تأیید صحت سنجی مدل اجزاء محدود

به منظور صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، با مدل‌سازی و انتخاب پارامترهای مناسب و اعمال شرایط مرزی صحیح، به تحلیل مسئله توسط نرم‌افزار پرداخته و نتایج حاصل با نتایج حل‌های فرم بسته و یا اندازه‌گیری‌های موجود در محل مقایسه شده است. انتخاب یک مدل رفتاری مناسب، به منظور شبیه‌سازی رفتار محیط مورد مطالعه، اولین قدم در حل مسائل به روش عددی است. در این میان مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل رفتاری، اهمیت زیادی دارد. در بخش کنونی، عملکرد مدل رفتاری موهر - کولمب اصلاح شده بر اساس نتایج آزمایش‌های سه محوری بر روی خاک منجمد، در شبیه‌سازی رفتار مصالح دیوار خاک منجمد ارزیابی شده است. به این منظور با استفاده از روش اجزاء محدود، آزمایش سه محوری تحکیم نیافته‌ی زهکشی نشده بر روی خاک منجمد در دماها و تنش‌های محدودکننده‌ی مختلف به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شد. مقدار فشار همه‌جانبه در طول آزمایش برای ترازهای مختلف ثابت نگه داشته شد و سطح تحتانی مدل با نرخی ثابت به منظور ارائه‌ی تنش انحرافی، به سمت بالا حرکت داده شد. برای نیل به هدف مذکور، از یک استوانه به قطر 50 و ارتفاع 100 میلی‌متر همانند نمونه‌های موجود در آزمایشگاه استفاده شد. نوع المان استفاده شده از نوع C3D8Solid بود. به منظور مدل‌سازی شرایط مرزی آزمایشگاهی، از یک Surface traction جهت اعمال تنش همه‌جانبه به نمونه استفاده شد. با توجه به عدم مشاهده‌ی لغزش مابین نمونه خاک‌های منجمد، شرایط انتهایی نمونه‌های منجمد به صورت Fix در جهت‌های برشی و در صفحه‌ی مشترک نمونه و Cap در نظر گرفته شد. سپس با اعمال کرنش در انتهای (بالا) نمونه



شکل ۹. تأثیر کاهش دما در تغییر مکان جانبی مرکز دیوار خاک منجمد در عمق حفاری ۶ متر و تحت سربار ۱۹۵ کیلو پاسکال.



شکل ۱۰. تأثیر کاهش دما در تغییر مکان جانبی تاج دیوار خاک منجمد از مرکز تا تکیه‌گاه تحت سربار ۲۶۴ کیلو پاسکال و گودبرداری ۶ متر.

۱۸/۶٪ است. ملاحظه می‌شود که کاهش تغییر مکان از محل مرکز سربار تا تکیه‌گاه برای تمامی دماها تقریباً یکسان است. همچنین با کاهش دما، تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود در تمامی قسمت‌های تاج دیوار کاهش می‌یابد، و کاهش مذکور در محل تکیه‌گاه دیوار کمی بیشتر است. با بررسی تمامی مقاطع دیوار خاک منجمد نیز می‌توان ملاحظه کرد که کاهش دما تقریباً با روند یکسانی، تغییر مکان جانبی به سمت گود را کاهش می‌دهد به غیر از بازه دمای -6°C تا -7°C که ناشی از نتایج آزمایش سه محوری است. چرا که سایر شرایط موجود برای هر تحلیل دقیقاً یکسان است.

۲.۵. بررسی تأثیر سربار در پایداری سازه‌ی دیوار خاک منجمد

در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر سربار در پایداری دیوار خاکی منجمد بررسی شده است، به طوری که مدل تحت سربارهای صفر، ۱۱۷، ۱۹۵ و ۲۶۴ کیلو پاسکال تحت دماهای مختلف و عمق‌های گودبرداری مختلف در نظر گرفته شده است. ارتفاع دیوار خاک منجمد ۱۵ متر و ضخامت آن ۱ متر مدنظر قرار گرفته است. شکل ۱۱، تأثیر انواع سربار در تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد (در دمای -96°C) را در مقابل ارتفاع برای مرکز دیوار و گودبرداری ۶ متر نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور

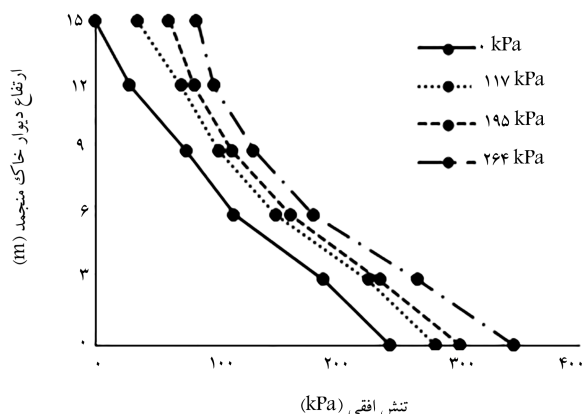
بخش ۴ اشاره شد، عوامل مؤثر در پایداری دیوار منجمد خاکی، که در نوشتار حاضر به صورت پارامتریک مطالعه شده‌اند، عبارت‌اند از: دمای دیوار خاک منجمد، تأثیر اعماق مختلف گودبرداری و سربار ناشی از وزن سازه‌های واقع بر سطح زمین در مجاورت گودبرداری. برای نیل به این هدف، ۲۴ تحلیل سه بعدی اجزاء محدود توسط نرم‌افزار مذکور انجام شد؛ که در ادامه، به بررسی تأثیر تک تک پارامترها پرداخته شده است.

۱.۵. بررسی تأثیر کاهش دما در پایداری سازه‌ی دیوار خاک منجمد

با توجه به افزایش قابل توجه مقاومت برشی خاک منجمد در اثر کاهش دما، انتظار می‌رود عامل دما تأثیر قابل ملاحظه‌ی در نتایج تحلیل مدل عددی داشته باشد. شکل ۹، تأثیر کاهش دما را در تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به ترتیب در امتداد سربار ۱۹۵ کیلو پاسکال و پس از ۶ متر گودبرداری نشان می‌دهد. مطابق نتایج به دست آمده از تحلیل عددی، از تراز کف دیوار خاک منجمد (عمق ۱۵ متری) تا ارتفاع ۹ متری دیوار، کاهش دما تأثیری در تغییر مکان جانبی دیوار نداشته است که دلیل آن وجود منطقه‌ی مقاوم تا ارتفاع مذکور است و از آنجایی که در هر دو سمت دیوار، خاک غیر منجمد موجود و عمق مدفون کافی است، اجازه‌ی تغییر مکان دیوار خاک منجمد از این تراز تا کف دیوار داده نشده است. از این رو در شکل ۹، تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد از ارتفاع ۶ متری تا ۱۵ متری نمایش داده شده است. مطابق شکل اخیر، در ارتفاع ۱۲ متری دیوار (عمق ۳ متری سطح زمین)، کاهش دما از -6°C تا -11°C منجر به کاهش ۱۶/۲٪ تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد شده است.

همچنین در ارتفاع ۱۵ متری دیوار (سطح زمین)، کاهش دما از -6°C تا -11°C باعث شده است که تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود حدود ۱۷/۷٪ کاهش یابد. قابل ملاحظه است که از عمق ۹ تا ۱۲ متری، نرخ افزایش تغییر مکان به بیشترین حد خود رسیده است. دلیل این امر وجود جبهه‌ی مقاوم و متعاقب آن وجود نیروی جانبی مقاوم است که تا تراز ۹ متری اجازه‌ی تغییر مکان آن چنانی به دیوار نداده و بلافاصله پس از خالی شدن قسمت مقاوم در مقابل دیوار خاک منجمد، تغییر مکان جانبی با نرخ بالایی افزایش نشان داده است. همچنین پس از ارتفاع ۱۲ متری دیوار تا سطح زمین (ارتفاع ۱۵ متری)، به دلیل وقوع تغییر شکل‌های بزرگ، اثر محدودکنندگی و تنش افقی کاهش یافته و منجر به کاهش نرخ تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که کاهش تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود برای حالتی که سربار در بالادست گود وجود دارد، بیشتر از حالت بدون سربار است لذا کاهش مذکور در ناحیه‌ی تکیه‌گاه دیوار، بزرگ‌تر است. بنابراین در صورت وجود سربار، کاهش دما پارامتر مناسبی برای کاهش مقدار تغییر مکان جانبی مرکز دیوار خاک منجمد است. اما در صورت عدم وجود سربار، کاهش دما راه حل مناسبی برای کاهش تغییر مکان به ویژه در محل تکیه‌گاه دیوار نیست.

شکل ۱۰، تغییر مکان جانبی تاج دیوار خاک منجمد از مرکز تا تکیه‌گاه را برای دماهای -6°C تا -11°C تحت گودبرداری ۶ متر نشان می‌دهد. قابل توجه است که مطابق شکل ۱۰، کاهش دما منجر به کاهش تغییر مکان جانبی دیوار به سمت گود می‌شود. همچنین دماها و تحت سربار ۲۶۴ کیلو پاسکال در مرکز دیوار، هر چه از مرکز دیوار به سمت تکیه‌گاه دیوار نزدیک می‌شویم، تغییر مکان به سمت گود کاهش می‌یابد. به طوری که این کاهش برای دماهای -6°C ، -7°C ، -8°C ، -9°C ، -10°C ، -11°C ، به ترتیب ۱۷/۳٪، ۱۶/۹٪، ۱۴/۸٪، ۱۲/۳٪، ۱۲/۵٪ و



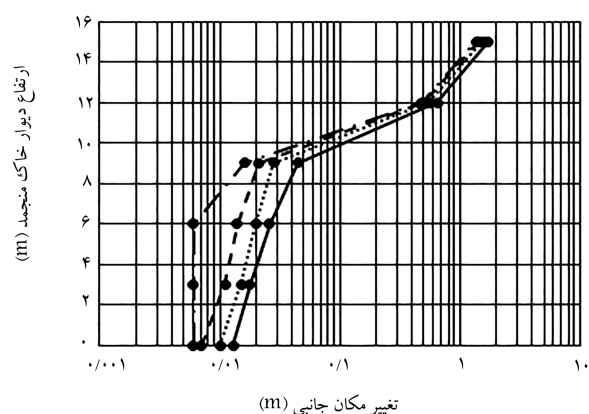
شکل ۱۲. توزیع فشار جانبی وارد بر دیوار خاک منجمد در امتداد سربار در دمای $11^{\circ}C$ - برای سربارهای مختلف در تراز گودبرداری ۶ متری.

در پای دیوار برای حالت بدون سربار عدد ۲۶۵ کیلوپاسکال به دست می‌آید، که بزرگ‌تر از عدد به دست آمده از خروجی مدل عددی است که دلیل آن منظور کردن کاهش تنش ناشی از رهاسازی و وقوع کرنش در پشت دیوار خاک منجمد است. برای سربارهای ۱۰، ۲۵ و ۲۰ طبقه نیز همین استدلال پا برجاست. با این تفاوت که تغییر شیب بین ترازهای مختلف کمی بیشتر از حالت بدون سربار است، که به علت وقوع تغییرشکل‌های بزرگ ناشی از وجود سربار است. همچنین به دلیل وجود سربار در سطح زمین و در مجاورت دیوار، مطابق شکل ۱۲، تنش‌های افقی از مقادیری بزرگ‌تر از صفر آغاز می‌شود و تا عمق پای دیوار امتداد می‌یابد.

مطابق شکل ۱۲، از عمق گود ۹ تا ۱۲ متری، بیشترین نرخ تغییرشکل ایجاد شده است؛ در حالی که از عمق ۱۲ تا ۱۵ متری گود، نرخ تغییرشکل کاهش یافته است که به دلیل وجود نیروی مقاوم در قسمت تحتانی تا ۹ متری عمق است. به طوری که بلافاصله پس از ۹ تا ۱۲ متری که محل اعمال بیشینه نیروی جانبی است، بیشترین نرخ تغییرشکل رخ داده و پس از آن به دلیل وقوع تغییرشکل بزرگ، اثر محدودکنندگی و تنش افقی کاهش یافته است. همچنین قابل ملاحظه است که تا عمق ۹ متری، افزایش دما تأثیر اندکی در تغییرشکل‌های گود دارد. چرا که به دلیل عدم استفاده از مهار در پشت دیوار خاک منجمد، جهت بررسی رفتار واقعی دیوار خاک منجمد، به تنهایی نیروی محرک بر نیروی مقاوم تا عمق ۹ متری غلبه می‌کند و تأثیر دما به وضوح مشاهده نمی‌شود. هر چند در پروژه‌های واقعی استفاده از مهار به همراه سازی خاک منجمد پیشنهاد می‌شود.

۳.۵. بررسی تأثیر گودبرداری در پایداری سازه‌ی دیوار خاک منجمد

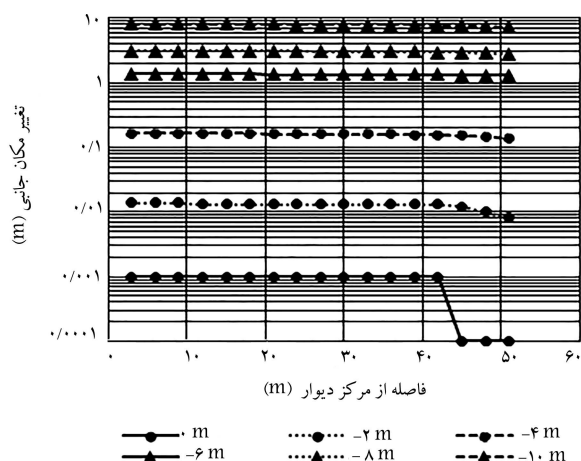
به منظور بررسی تأثیر گودبرداری و عمق آن در پایداری دیوار خاکی منجمد در تمامی مدل‌سازی‌ها، گودبرداری ۱۰ متری نه به صورت یک جا، بلکه در گام‌های ۲ متری (۵ گام ۲ متری) در نظر گرفته شده است. ارتفاع دیوار ۱۵ مترو ضخامت آن ۱ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۱۳، تأثیر عمق گودبرداری (از ۰ تا ۱۰ متر برای دیوار خاک منجمد در دمای $11^{\circ}C$ - و در مرکز دیوار تحت سربار ۱۱۷ کیلوپاسکال) را در توزیع تغییرمکان جانبی در ارتفاع دیوار نشان می‌دهد. با بررسی تک تک نمودارها در می‌یابیم که تا گودبرداری عمق ۴ متری از سطح زمین، تغییرمکان‌ها کوچک و قابل قبول بوده و از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول، که در آن نرخ تغییرمکان نزدیک به صفر است و قسمت دوم که در آن نرخ تغییرمکان افزایش می‌یابد، اما با این حال تغییرمکان‌ها در محدوده‌ی قابل قبول هستند. از عمق



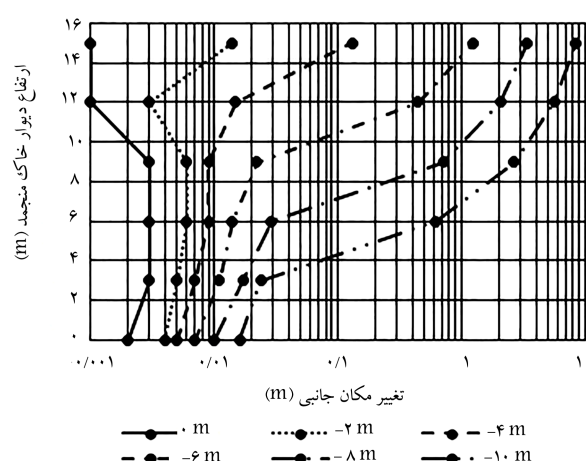
شکل ۱۳. تأثیر شدت سربار در تغییرمکان جانبی در ارتفاع دیوار خاکی منجمد در دمای در مرکز $9^{\circ}C$ - دیوار و عمق گودبرداری ۶ متر.

برای تراز سطح زمین، تغییرمکان جانبی دیوار خاک منجمد نسبت به حالت بدون سربار برای سربارها، ۱۱۷، ۱۹۵ و ۲۶۴ کیلوپاسکال به ترتیب ۳/۷٪، ۱۲/۶٪ و ۲۶/۲٪ افزایش داشته است. همچنین برای گودبرداری به عمق ۳ متر، مقادیر مذکور به ترتیب ۴/۴٪، ۱۵/۶٪ و ۳۴٪ و برای گودبرداری به عمق ۶ متر، به ۳۱/۳٪، ۷۵٪ و ۱۸۱/۳٪ افزایش می‌یابند. مطابق شکل ۱۱ و همانند شکل ۹ قابل ملاحظه است که دیوار خاک منجمد در ناحیه‌ی مقاوم تغییرشکل آن‌چنانی ندارد و از ارتفاع ۹ تا ۱۲ متری به دلیل حذف فشار جانبی مقاوم، نرخ تغییرمکان جانبی نسبت به ۱۲ تا ۱۵ متری با توجه به استدلال ارائه شده در بخش قبل بیشتر است. حال آنکه افزایش سربار در تراز ۹ تا ۱۲ متری منجر به افزایش بیشتر تغییرمکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود شده و در تراز مذکور، اثرگذاری بیشتری داشته است. در حالت کلی با توجه به نمودارهای شکل ۱۱ می‌توان دیوار خاک منجمد را از لحاظ الگوی تغییرمکان جانبی به ۳ قسمت تقسیم کرد: قسمت اول، تراز کف تا ۹ متری که در آن تغییرمکان‌ها بسیار کوچک و قابل اغماض هستند؛ قسمت دوم، تراز ۹ تا ۱۲ متری که به دلیل حذف فشار جانبی مقاوم، تغییرمکان‌های بسیار بزرگی رخ داده است و قسمت سوم، تراز ۱۲ تا ۱۵ متری که تغییرمکان‌ها نسبت به قسمت دوم کوچک‌تر بوده و نوع تغییرمکان با توجه به نقطه عطفی که در توزیع تغییرمکان جانبی دیوار خاک منجمد به وجود آمده است، صلب‌گونه است. در نهایت، تحلیل نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شدت سربار تأثیر قابل ملاحظه‌ی در تغییرمکان جانبی دیوار خاک منجمد دارد و با حرکت از سمت تاج به سمت پای دیوار، نرخ افزایش مذکور تغییر می‌یابد.

بررسی تأثیر تغییرات سربار در توزیع تنش افقی در مقاطع مختلف دیوار در امتداد زیر سربار، با فاصله از سربار و نیز در محل تکیه‌گاه انجام شده است. توزیع فشار جانبی وارد بر ارتفاع دیوار در امتداد مرکز سربار برای سربارهای مختلف و حالت بدون سربار برای دیوار خاک منجمد در دمای $11^{\circ}C$ - و در تراز گودبرداری ۶ متر در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، برای حالت بدون سربار، تنش جانبی در مجاورت سطح زمین (ارتفاع ۱۵ متری دیوار خاک منجمد) از صفر آغاز می‌شود و تا عمق ۱۵ متری با شیب تقریباً یکسانی امتداد می‌یابد، به طوری که تغییر شیب قسمت‌های مختلف نمودار توزیع تنش در ترازهای مختلف دیوار خاک منجمد تقریباً به هم نزدیک هستند. دلیل این تغییر شیب‌های جزئی، وقوع تغییرمکان‌های نسبتاً کوچک و کاهش یا افزایش تنش افقی در گام‌های مختلف مدل‌سازی عددی است. با محاسبه‌ی دستی فشار جانبی خاک



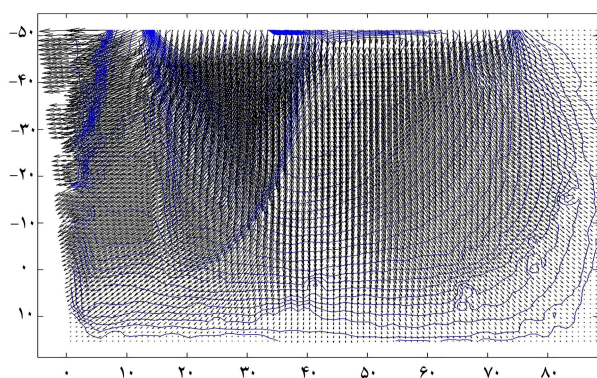
شکل ۱۴. تأثیر ترازهای مختلف گودبرداری در تغییر مکان جانبی تاج دیوار منجمد خاکی در دمای 10°C - و بدون حضور سربار از مرکز تا تکیه‌گاه دیوار.



شکل ۱۳. تأثیر عمق گودبرداری در تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد در دمای 11°C - تحت سربار 117 کیلوپاسکال در مرکز دیوار.



شکل ۱۵. تصویری از مدل‌سازی فیزیکی در محیط آزمایشگاه.



شکل ۱۶. بردارهای تغییر مکان و کانتورهای جابه‌جایی حاصل از مدل‌سازی فیزیکی به روش PIV.

(PIV)^[۴۵] جهت بررسی دقیق رفتار و تغییر مکان دیوار خاک منجمد و مطابقت نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیکی با مدل‌سازی عددی استفاده شده است. شکل ۱۶، بردارهای تغییر مکان و نیز کانتورهای جابه‌جایی را در انتهای مدل‌سازی فیزیکی مذکور نشان می‌دهد. منظور از بردارهای جابه‌جایی، بردارهایی هستند که جابه‌جایی کل (جابه‌جایی افقی و قائم به صورت هم‌زمان) را جهت بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهند. آنچه در شکل ۱۶ جلب توجه می‌کند، کوچک‌تر شدن بردارهای جابه‌جایی از بالا به پایین دیوار است، به طوری که در پای دیوار مقدار جابه‌جایی‌ها تقریباً به صفر

گودبرداری 4 تا 10 متر نمودارها از 3 قسمت و یک نقطه‌ی عطف تشکیل شده‌اند که تفسیر آن در بخش ۴ توضیح داده شده است. پرواضح است که با افزایش عمق گود، تغییر مکان جانبی به شدت افزایش می‌یابد و مقدار افزایش مذکور برای تاج دیوار، بیشترین مقدار است. به نظر می‌رسد که عمق گودبرداری تا 4 متر، برای حالتی که از روش دیوار خاک منجمد به تنهایی استفاده شود، قابل قبول خواهد بود. برای اعماق بیشتر توصیه می‌شود در درجه‌ی اول از مهار یا پشت‌بند، و در درجه‌ی دوم از ضخامت‌های بیشتر و یا در صورت امکان، قوسی ساختن دیوار خاک منجمد استفاده شود. شکل ۱۴، تأثیر ترازهای مختلف گودبرداری برای دیوار خاک منجمد در دمای 10°C - و بدون حضور سربار در تغییر مکان جانبی تاج دیوار از مرکز تا تکیه‌گاه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در نزدیکی تکیه‌گاه دیوار، تغییر مکان جانبی تاج برای تمامی عمق‌های گودبرداری کاهش یافته است؛ هر چند مقدار آن بسیار جزئی است. این تذکر لازم است که اعداد تغییر مکان‌های جانبی بسیار بزرگ، فقط جهت معرفی یک حالت ناپایدار ارائه شده است و پرواضح است که در عمل قبل از رسیدن به چنین تغییر مکان‌هایی، گسیختگی و ناپایداری دیوار خاک منجمد حاصل خواهد شد.

۴.۵. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با مدل‌سازی فیزیکی

آنچه در این نتایج مشهود است، وجود تغییر مکان‌های نسبتاً غیرقابل قبول (در حدود 1 متر) پس رسیدن عمق گود به 6 متر است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، هدف از مطالعه‌ی حاضر، امکان‌سنجی استفاده از تکنولوژی انجماد مصنوعی زمین جهت نگهداری گود به کمک دیوار خاک منجمد ظریف و بررسی قابلیت تغییر شکل‌پذیری آن است. برای بررسی بهتر این موضوع، یک آزمایش مدل‌سازی فیزیکی با اعمال شرایط مرزی و تحلیل ابعادی صحیح انجام شد. شکل ۱۵، تصویری واقعی از محیط آزمایشگاهی و جعبه‌ی مدل‌سازی به همراه تجهیزات مورد استفاده شامل واحد تبرید با کنترل اتوماتیک، جک بارگذاری کرنش کنترل، دوربین با قابلیت عکس برداری 20 فریم بر ثانیه و نیز استفاده از صفحه‌ی پلکسی گلاس در وجه رو به دوربین در جعبه‌ی مدل‌سازی، تنش‌سنج و LVDT به منظور کنترل تنش و کرنش در محل سربار مجاور دیوار است.

در مدل‌سازی فیزیکی ذکر شده، علاوه بر کنترل تنش و کرنش در محل سربار و در بالادست گودبرداری (به مانند مدل عددی) از روش سرعت‌سنجی تصویری

شد. سپس با استفاده از مدل سازی آزمایش سه محوری بر روی خاک منجمد در نرم افزار آباکوس، مدل رفتاری موهر-کولمب براساس نتایج آزمایشگاهی سه محوری اصلاح و صحت سنجی شد؛ به طوری که قابلیت مدل سازی نرم شوندگی مصالح را داشته باشد. سپس هندسه مدل مربوط به گودبرداری ایستگاه مترو با روش کند و پوش، به طول ۱۰۲ متر و عمق ۱۰ متر شبیه سازی شد. همچنین جهت بررسی بهتر موضوع، یک آزمایش مدل سازی فیزیکی با اعمال شرایط مرزی و تحلیل ابعادی صحیح انجام شد. نتایج و اندازه گیری ها نشان دادند که حتی در تغییر مکان های جانبی بسیار بزرگ در حدود ۱ متر (پس از آنالیز ابعادی)، دیوار خاک منجمد به صورت ترد گسیخته نمی شود و به طور شکل پذیری تغییر شکل می دهد. جنبه ی مثبت یافته ی مذکور این است که در صورت تحلیل و طراحی صحیح، گسیختگی سازه یی ترد در بدنه ی دیوار خاک منجمد رخ نخواهد داد. نکته ی قابل توجه یافته ی حاضر آن است که وقوع تغییر مکان های بزرگ (حتی بدون وقوع گسیختگی) هم بالادست و هم درون گود را غیر قابل بهره برداری خواهد کرد. از این رو در صورت استفاده از دیوار خاک منجمد به ضخامت کم (در حدود ۱ متر) پیشنهاد می شود از مهارها یا پشت بندها جهت کنترل تغییر مکان دیوار استفاده شود.

افزایش سربار در وسط دیوار منجر به افزایش تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود می شود، که نرخ افزایش مذکور با نزدیک شدن به تکیه گاه دیوار کاهش می یابد. بررسی نتایج خروجی از نرم افزار نشان می دهد که دیوار خاک منجمد در ناحیه ی مقاوم تغییر شکل آن چنانی ندارد و پس از آن، به دلیل حذف فشار جانبی مقاوم، نرخ تغییر مکان جانبی افزایش می یابد. در حالت کلی برای یک گودبرداری ۶ متری در مطالعه ی حاضر، می توان دیوار خاک منجمد را از لحاظ الگوی تغییر مکان جانبی به ۳ قسمت تقسیم کرد: قسمت اول، تراز کف تا ۹ متری که در آن تغییر مکان ها بسیار کوچک و قابل اغماض هستند؛ قسمت دوم، تراز ۹ تا ۱۲ متری که به دلیل حذف فشار جانبی مقاوم، تغییر مکان های بسیار بزرگی رخ داده است؛ و قسمت سوم، تراز ۱۲ تا ۱۵ متری که تغییر مکان ها نسبت به قسمت دوم کوچک تر هستند و نوع تغییر مکان با توجه به نقطه ی عطفی که در توزیع تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به وجود آمده، صلب گونه است. در نهایت، تحلیل یافته ها نشان می دهند که شدت سربار تأثیر قابل ملاحظه یی در تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد دارد و با حرکت از سمت تاج به سمت پای دیوار، نرخ افزایش مذکور، تغییر می یابد.

بررسی تأثیر تغییرات سربار در توزیع تنش افقی در مقاطع مختلف دیوار در امتداد زیر سربار نشان می دهد که تنش جانبی در مجاورت سطح زمین عددی نزدیک به مقدار سربار موجود آغاز شده و تا عمق ۱۵ متری با تغییر شیب بین ترازهای مختلف قابل مشاهده است که علت آن وقوع تغییر شکل های بزرگ ناشی از وجود سربار است. پرواضح است که با افزایش عمق گودبرداری، تغییر مکان جانبی دیوار خاک منجمد به سمت گود افزایش می یابد. در نهایت می توان اظهار داشت که شدت سربار و عمق گودبرداری نسبت به دمای دیوار خاک منجمد، پارامترهای تأثیر گذارتری در پایداری دیوار خاک منجمد هستند.

می رسند، که نشان از اعمال خمش به دیوار خاک منجمد است. بدان معنا که دیوار خاک منجمد تحت سربار، جابه جایی افقی و یا دوران صلب گونه را تجربه نکرده است، بلکه دچار تغییر شکل سازه یی شده است؛ همانند آنچه که در مدل عددی به وقوع پیوسته است.

همچنین شکل ۱۶ نشان می دهد که فرضیه ی توزیع تغییر مکان به صورت حباب در زیر سربارها و شالوده ها صحیح است و حباب های ایجاد شده در کاتوره های تغییر مکان ارائه شده در شکل مذکور به وضوح قابل مشاهده است. نتایج و اندازه گیری ها نشان دادند که حتی در تغییر مکان های جانبی بسیار بزرگ در حدود ۱ متر (پس از آنالیز ابعادی)، دیوار خاک منجمد به صورت ترد گسیخته نمی شود و به طور شکل پذیری تغییر شکل می دهد. جنبه ی مثبت نتیجه ی به دست آمده آن است که در صورت تحلیل و طراحی صحیح، مطابق مشاهده های آزمایش های سه محوری و نتایج مدل سازی عددی و مدل سازی فیزیکی آزمایشگاهی، گسیختگی سازه یی ترد در بدنه ی دیوار خاک منجمد رخ نخواهد داد. نکته ی قابل توجه یافته ی مذکور آن است که وقوع تغییر مکان های بزرگ (حتی بدون وقوع گسیختگی) هم در بالادست و هم درون گود را غیر قابل بهره برداری خواهد کرد. از این رو در صورت استفاده از دیوار خاک منجمد به ضخامت کم (در حدود ۱ متر) پیشنهاد می شود از مهارها یا پشت بندها جهت کنترل تغییر مکان دیوار استفاده شود. که علت آن مقرون به صرفه و سریع بودن در مقابل ساخت دیوارهای خاک منجمد ضخیم (تا ضخامت های حدود ۳ متر) است. البته در صورت استفاده از تکنولوژی مذکور در خارج از محدوده ی شهری، که محدودیت فضا وجود نداشته باشد، می توان دیوارهای خاک منجمد ظریف (با ضخامت حدود ۱ متر) را به صورت قوسی تحلیل و طراحی کرد که پیشنهاد می شود این مورد برای مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد.

۶. نتیجه گیری

در مطالعه ی حاضر، تأثیر دمای خاک منجمد، شدت سربار و عمق گودبرداری (عمق مدفون) در پایداری دیوار خاکی منجمد بررسی شده است. هندسه ی طرح و مشخصات مکانیکی خاک غیر منجمد و خاک منجمد مورد استفاده براساس مطالعه ی موردی خط ۲ قطار شهری تبریز شبیه سازی شده است. به منظور مدل سازی عددی، در تمامی مراحل مطالعه ی حاضر از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. برای مدل سازی خاک غیر منجمد، پس از به دست آوردن پارامترهای مکانیکی حاصل از انجام آزمون های آزمایشگاهی بر روی نمونه های استحصال شده از گمانه ها، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شد. از آنجایی که خاک منجمد یک مصالح نامتعارف است و مدل رفتاری مناسبی 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 نمونه های خاک منجمد انجام

پانویس ها

1. barcelona basic model

2. peak
3. residual
4. Mohr-Coulomb
5. Hex-dominated

(References) منابع

1. Yamamoto, Y. and Springman, S.M. "Three-and four-point bending tests on artificial frozen soil samples at temperatures close to 0° C", *Cold Regions Science and Technology*, **134**, pp. 20-32 (2017).
2. Zhang, Sh., Teng, J., He, Z. and et al. "Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: A numerical study", *Cold Regions Science and Technology*, **126**, pp. 1-9 (2016).
3. Zhang, Z., Zhou, H., Feng, W. and et al. "A spherical template indenter for a frozen soil long-term shear strength test", *Cold Regions Science and Technology*, **131**, pp. 10-15 (2016).
4. Yang, Y., Wei, Z., Yin, G. and et al. "Uniaxial compression test of frozen tailings", *Cold Regions Science and Technology*, **129**, pp. 60-68 (2016).
5. Chamberlain, E.J. "Over-consolidation effects of ground freezing", *Engineering Geology*, **18**(1), pp. 97-110 (1981).
6. Jones, J.S. "State-of-the-art report-Engineering practice in artificial ground freezing", *Engineering Geology*, **18**(1), pp. 313-326 (1981).
7. Shuster, J.A. "Engineering quality assurance for construction ground freezing", *Engineering Geology*, **18**(1), pp. 333-350 (1981).
8. Colombo, G., Lunardi, P., Cavagna, B. and et al. "The artificial ground freezing technique application for the Naples underground", *In Proceedings of Word Tunnel Congress*, pp. 910-921 (2008).
9. Ou, Ch.-Y., Kao, Ch.-Ch. and Chen, Ch.-I. "Performance and analysis of artificial ground freezing in the shield tunneling", *Journal of GeoEngineering*, **4**(1), pp. 29-40 (2009).
10. Kirsch, F. and Richter, T.H. "Ground freezing for tunneling under historical structures", *Proceedings 17th IC-SMGE, Alexandria, Egypt* (2009).
11. Thumann, V.M., Hannink, G. and de Doelder, B.R. "Ground freezing and groundwater control at underground station CS in Rotterdam", *Proceedings 17th IC-SMGE, Alexandria, Egypt* (2009).
12. Rupprecht, E. "Application of the ground-freezing method to penetrate a sequence of water-bearing and dry formations-three construction cases", *Engineering Geology*, **13**(1), pp. 541-546 (1979).
13. Pimentel, E., Sres, A. and Anagnostou, G. "Modelling of ground Underground Space-The 4th Dimension freezing in tunneling", *In of Metropolises, ITA and World Tunnel Congress*, 1, Prague, pp. 331-336 (2007).
14. Esmacili-Falak, M. "Effect of system's geometry on the stability of frozen wall in excavation of saturated granular soils", *Doctoral dissertation, University of Tabriz*, (2017).
15. Ting, J.M. "The creep of frozen sands: Qualitative and quantitative models", *Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge Dept. of Civil Engineering*, R81-5 (1981).
16. Li, S., Lai, Y., Zhang, M. and Zhang, Sh. "Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel", *Cold Regions Science and Technology*, **46**(3), pp. 181-191 (2006).
17. Frivik, P.E. "State-of-the-art report. Ground freezing: Thermal Engineering properties, modelling of processes and thermal design", *Geology*, **18**(1), pp. 115-133 (1981).
18. Lunardi, P., Leoni, F. and Valente, A. "Full scale test of grouting and freezing for new extension of Rome underground, line B1", *Proceedings of The In AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress*, 1, Milan, Italy, pp. 499-507 (2001).
19. Wei, M. and Chang, X. "Analyses of strength and deformation of an artificially frozen soil wall in underground engineering", *Cold Regions Science and Technology*, **34**(1), pp. 11-17 (2002).
20. Cuvuto, F., Colombo, G. and Giannelli, F. "An alternative tunneling approach to accelerate urban underground excavation under water", *International fib Symposium, Tailor Made Concrete Structures*, In pp. 993-999 (2008).
21. Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S. and et al. "THM-coupled finite element analysis of frozen soil: Formulation and application", *Geotechnique*, **59**(3), pp. 159-171 (2009).
22. Yang, Y., Lai, Y. and Chang, X. "Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil", *Cold Regions Science and Technology*, **64**(1), pp. 39-45 (2010).
23. Dall'Amico, M., Endrizzi, S., Gruber, S. and et al. "A robust and energy-conserving model of freezing variably-saturated soil", *The Cryosphere*, **5**(2), pp. 469-484 (2011).
24. Li, D.-W., Fan, J.-H. and Wang, R.-H. "Research on visco-elastic-plastic creep model of artificially frozen soil under high confining pressures", *Cold Regions Science and Technology*, **65**(2), pp. 219-225 (2011).
25. Liu, J. and Xie, J. "Nonlinear analyses for the permeability coefficient of frozen soil", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **17**, pp. 3875-3884 (2012).
26. Zhou, M. "Computational simulation of soil freezing: Multiphase modeling and strength upscaling", *PhD diss., Ruhr University Bochum* (2013).
27. Yang, W., Kong, L. and Chen, Y. "Numerical evaluation on the effects of soil freezing on underground temperature variations of soil around ground heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, **75**, pp. 259-269 (2015).
28. Li, Q., Ling, X. and Sheng, D. "Elasto-plastic behavior of frozen soil subjected to long-term low-level repeated loading. Part II: Constitutive modelling", *Cold Regions Science and Technology*, **122**, pp. 58-70 (2016).
29. Sayles, F.H. "Creep of frozen sands", *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH, Crrel-Tr-190* (1968).
30. Sayles, F.H. and Haines, D. "Creep of frozen silt and clay", *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH, Crrel-Tr-252* (1974).
31. Williams, P.J. "Unfrozen water content of frozen soils and soil moisture suction", *Geotechnique*, **14**(3), pp. 231-246 (1964).
32. Ziegler, M., Baier, C., Aulbach, B. and et al. "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, pp. 562-565 (2009).
33. Lackner, R., Amon, A. and Lager, H. "Artificial ground freezing of fully saturated soil: Thermal problem", *Journal of Engineering Mechanics*, **131**(2), pp. 211-220 (2005).
34. Lai, Y., Li, S., Qi, J. and et al. "Strength distributions Cold of warm frozen clay and its stochastic damage constitutive model", *Regions Science and Technology*, **53**(2), pp. 200-215 (2008).
35. Pimentel, E., Papakonstantinou, S. and Anagnostou, G. "Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling", *Tunneling and Underground Space Technology*, **28**(1), pp. 57-69 (2012).
36. Casini, F., Gens, A., Olivella, S. and et al. "Triaxial tests on frozen ground: formulation and modelling", *In Computational Plasticity XII: Fundamentals and Applications-Proceedings of the 12th International Conference on Computational Plasticity*, pp. 534-541 (2013).
37. Yugui, Y. "Experimental and theoretical investigations on the deformation characteristic of frozen silt in underground engineering", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **19**, pp. 1883-1894 (2012).
38. Lai, Y., Xu, X., Yu, W. and et al. "An experimental investigation of the mechanical behavior and a hyper-plastic constitutive model of frozen loess", *International Journal of Engineering Science*, **84**, pp. 29-53 (2014).
39. Li, Q., Ling, X. and Sheng, D. "Elasto-plastic behavior of frozen soil subjected to long-term low-level repeated loading, Part II: Constitutive modelling", *Cold Regions Science and Technology*, **122**, pp. 58-70 (2016).
40. Zhao, L., Yang, P., Zhang, L. and et al. "Cyclic direct shear behaviors of an artificial frozen soil-structure interface under constant normal stress and sub-zero temperature", *Cold Regions Science and Technology*, **133**, pp. 70-81 (2017).
41. Zhiwu, Z., Kang, G., Yue, M. and et al. "Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading", *Mechanics of Materials*, **102**, pp. 108-116 (2016).
42. An, W.D., Wu, Z.W. and Ma, W. "Interaction among temperature, moisture and stress fields in frozen soil", Lanzhou University Press, Lanzhou (1990).
43. Wang, J.P., Wang, Z.Y. and Wu, Q.J. "Three-dimensional finite element analysis of stress and deformation of frozen wall in deep thick clay layer", *Journal of Glaciology and Geocryology*, **15**(2), pp. 309-316 (1993).
44. Potts, D.M. and Zdravkovi, L. *Finite element analysis in geotechnical engineering: Application*, Thomas Telford, **2**, (2001).
45. White, D.J., Take, W.A. and Bolton, M.D. "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry", *Geotechnique*, **53**(7), pp. 619-632 (2003).