



اثر شیرابه و چرخه های یخ زدگی-ذوب شدگی بر نفوذپذیری عایق های اساس رسی

مهدی قلیخانی، کاظم بدو*

دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰

کلمات کلیدی:

یخ زدگی - ذوب شدگی
ضریب نفوذپذیری
رس متراکم
عایق رسی - ژئوسینتتیک
شیرابه

خلاصه: اثر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم و عایق رسی ژئوسینتتیک در لاگون های فاضلاب و مدفن های زباله شهری، موضوع اساسی در طراحی سیستم های مانع انتقال در این سازه ها می باشد. در این تحقیق اثر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم منطقه نازلوی ارومیه و عایق رسی ژئوسینتتیک و همچنین تاثیر میزان تنش موثر بر نرخ تغییر ضریب نفوذپذیری نمونه های رسی، تحت نفوذ آب و شیرابه بررسی شده است. دستگاه تعیین ضریب نفوذپذیری سه محوری با دیواره انعطاف پذیر برای اندازه گیری ضریب نفوذپذیری نمونه ها مورد استفاده قرار گرفته است. در طول دوره یخ زدگی لندهای یخی در نمونه شکل گرفته و پس از ذوب شدن باعث ایجاد یک شبکه مشخص از ترک ها در خاک شده و سبب افزایش در ضریب نفوذپذیری می شود. همچنین اندرکنش مواد شیمیایی با خاک رسی، موجب کاهش ضخامت آب دولایه و انقباض توده خاک شده و در نتیجه ضریب نفوذپذیری لایه های رسی افزایش می یابد. افزایش در ضریب نفوذپذیری لایه های رسی و عایق های رسی ژئوسینتتیک تحت نفوذ شیرابه، به مراتب کمتر از تغییرات ضریب نفوذپذیری تحت نفوذ آب برای نمونه های قرار گرفته در معرض چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی می باشد. افزایش تنش موثر باعث می شود نرخ افزایش در ضریب نفوذپذیری در اثر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی کاهش یابد. نتایج نشان می دهد بر خلاف خاک های رسی، در عایق رسی ژئوسینتتیک چرخه های متناوب یخ زدگی و ذوب شدگی تاثیر کمی در ضریب نفوذپذیری این لایه ها دارد.

۱- مقدمه

شامل ۱۴ خاک رسی متفاوت بود. نتایج نشان دادند که افزایش در ضریب نفوذپذیری تا ۱۴۰۰ برابر در نتیجه یخ زدگی - ذوب شدگی می تواند اتفاق بیافتد. افزایش در ضریب نفوذپذیری برای خاک رسی با ضریب نفوذپذیری اولیه کمتر، بیشتر بود. اتمان و بنسون در سال ۱۹۹۳ اثر تراکم و شرایط خارجی را بر ضریب نفوذپذیری سه خاک رسی متراکم با خواص متفاوت بررسی کردند. بررسی ها نشان دادند که گرادپان دمایی و تعداد چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بیشترین اثر را روی ضریب نفوذپذیری داشتند [۵]. چمبرلین و همکاران عکسپایی از مقاطع نازک رس متراکم یخ زده را ارائه کردند. ایشان افزایش در ضریب نفوذپذیری رس متراکم در اثر یخ زدگی - ذوب شدگی را به شبکه ای از ترک ها که در طول دوره یخ زدگی در خاک رسی شکل گرفتند نسبت دادند [۶]. هویت و دنیل گزارش کردند که ضریب نفوذپذیری یک لایه GCL نسبت به آب، بعد از یک تا سه چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی تغییر نمی کند [۷]. کراوس و بنسون نتایج ضرایب نفوذپذیری برای یک لایه GCL را که در معرض تا ۲۰ چرخه

کنترل نشت و ایجاد مانع هیدرولیکی یکی از مسائل مهم در مهندسی عمران می باشد. هزینه بالای مصالح عایق مصنوعی و غیراقتصادی بودن استفاده از آن ها در پروژه های بزرگ باعث شده است تا مصالح با نفوذپذیری کم طبیعی، بیشتر مورد توجه قرار گیرند [۱]. مصالح طبیعی نیز به نوبه خود مشکلات خاصی را دارند که باعث شده است این مصالح با رضایت کامل مورد استفاده قرار نگیرند [۲]. اثر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم و عایق های رسی ژئوسینتتیک در سازه های ذخایر آب و مدفن های زباله شهری موضوع اساسی در طراحی سیستم های مانع انتقال در این سازه ها می باشد [۳].

محققین متعددی برای ارزیابی اثر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک های رسی متراکم مطالعاتی را انجام داده اند که یافته های این مطالعات توسط اتمان جمع بندی شده است [۴]. مطالعات

* نویسنده عهده دار مکاتبات: k.badv@urmia.ac.ir



یخ زدگی - ذوب شدگی قرار گرفته بود را گزارش کردند. نتایج این گونه بود که ضریب نفوذپذیری GCL نسبت به آب در اثر اعمال این چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی افزایش پیدا نمی‌کند [۸]. پادگتتری و بنت آزمایش‌های نفوذپذیری را بر روی یک لایه GCL سوزن دوزی شده تا ۱۵۰ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که یک لایه GCL سوزن دوزی شده با بنتونیت سدیمی می‌تواند حداقل ۱۵۰ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی بدون اینکه افزایش قابل توجهی در ضریب نفوذپذیری نسبت به آب داشته باشد، دوام بیاورد [۹]. ماکوسو و همکاران تاثیر همزمان تبادل کاتیونی و چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی را روی لایه‌های GCL بررسی کردند. افزایش اندکی در ضریب نفوذپذیری (تقریباً ۲ برابر) که به احتمال زیاد در اثر تبادل کاتیونی ایجاد شده بود بین ۱۵ تا ۲۰ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی اتفاق افتاد [۱۰].

زیمی و همکاران، برای مقایسه اثر دو نوع سیستم یخ زدگی - ذوب شدگی یک بعدی و سه بعدی، دو نمونه رسی با خواص مشابه را در درجه رطوبت‌های مختلف تحت اثر چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی یک بعدی و سه بعدی قرار دادند و سپس آزمایش‌های نفوذپذیری بر روی این دو نمونه انجام شدند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان دادند که ضریب نفوذپذیری به دست آمده برای این دو نمونه تقریباً یکسان است [۱۱]. با توجه به این مطلب در تحقیق حاضر نیز نمونه‌ها تحت اثر سیستم یخ زدگی - ذوب شدگی سه بعدی قرار گرفته‌اند. همچنین نمونه‌ها می‌توانند تحت یخ زدگی در سیستم بسته یا سیستم باز قرار گیرند. در یک سیستم بسته نمونه در طول مرحله یخ زدگی به هیچ منبع آب خارجی دسترسی ندارد [۱۲]. اهمیت انجام مطالعات در یک سیستم باز در مناطقی است که سطح آب زیرزمینی در عمق نزدیک به لایه‌های فوقانی بوده که این لایه‌ها در فصول سرما و در طول دوره یخ زدگی به آب زیرزمینی دسترسی دارند [۱۳]. در این تحقیق نمونه‌ها در یک سیستم بسته تحت اثر یخ زدگی قرار گرفته‌اند.

۱-۱- اثر پدیده یخ زدگی - ذوب شدگی بر ساختار خاک

در اثر پدیده یخ زدگی - ذوب شدگی دو نوع حفره در خاک رسی پدید می‌آید. نوع اول در اثر ترک‌های ایجاد شده در اثر خشک شدن خاک بعد از چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی می‌باشد و نوع دوم در اثر تشکیل شدن ذرات یخ در اثر انجماد آب داخل نمونه پدید می‌آید [۱۴]. زمانی که دمای خاک به زیر صفر درجه سانتی‌گراد افت می‌کند ذرات آب سرد شده و پس از تشکیل یخ ذرات یخ به درون حفرات نفوذ می‌کنند. در طول این تغییر فاز آب چیزی

حدود ۹٪ ساختار کریستالی شش ضلعی خود منبسط می‌شود. این ذرات کریستالی تا زمانی که ذرات کریستالی دیگر مانع شوند یا به ذرات خود خاک نزدیک شوند رشد می‌کنند [۱۵]. زمانی که دمای سطح خاک زیر صفر درجه سانتی‌گراد است یک جبهه یخ زده در سطح خاک شکل می‌گیرد [۱۶]. یخ زدگی آب باعث افزایش در فشار یخ و کاهش در فشار آب حفره ای می‌شود. به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ای در جبهه یخ زده آب از لایه‌های زیرین به طرف مرزهای یخ زده و درون خاک‌های یخ زده حرکت می‌کند حتی اگر خاک هیچ راه دسترسی به آب‌های خارجی نداشته باشد [۱۷]. وقتی که این آب به جبهه یخ زده رسید با پیش‌روی جبهه یخ زده این ترک‌ها با یخ پر می‌شوند. بعد که این یخ‌ها ذوب می‌شوند این ترک‌ها مجرای برای جریان آب می‌شوند [۱۸]. با افزایش نرخ یخ زدگی (یا گرادیان دمایی) وقت کمتری برای رشد لنزهای یخ در دسترس است و جبهه یخ زده به سرعت پیش‌روی می‌کند. بنابراین لنزهای یخ بیشتری با ضخامت و فواصل کوچک‌تر شکل می‌گیرند. در نتیجه ترک‌های بیشتری برای اینکه در آن‌ها جریان اتفاق بیافتد شکل می‌گیرند و ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد [۱۹].

۱-۲- اثر پدیده یخ زدگی - ذوب شدگی بر ساختار عایق‌های رسی

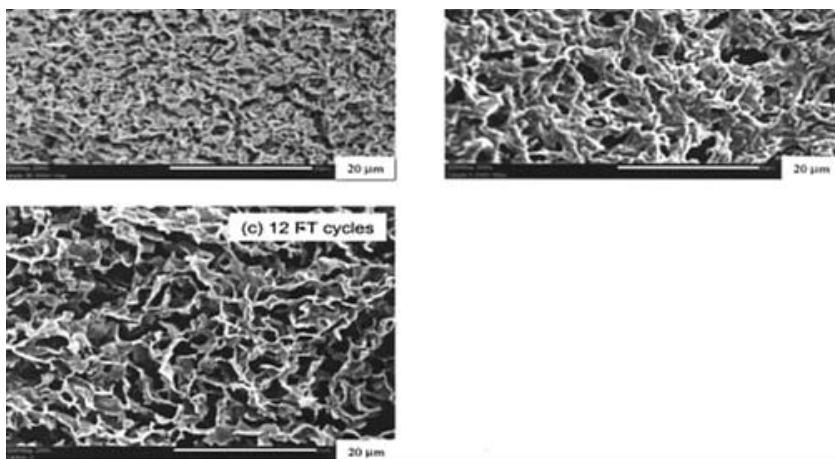
ژئوسینتتیک

در شکل ۱ عکس‌های ۲۰۰۰ برابر بزرگ‌تر شده از بنتونیت داخل نمونه‌های GCL که تحت ۰، ۵ و ۱۲ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی قرار گرفته نشان داده شده است [۲۰]. نواحی سیاه رنگ در تصاویر حفرات بنتونیت هستند. برای نمونه‌ای که تحت یخ زدگی - ذوب شدگی قرار نگرفته است اندازه حفرات تقریباً ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر است و به صورت یکنواخت گسترده شده‌اند. برای نمونه‌های قرار گرفته در معرض چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی اندازه این حفرات تقریباً ۳۰۰ تا ۶۰۰ میکرومتر است. همانطور که ملاحظه می‌شود اعمال چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی تاثیر چندانی بر ساختار عایق‌های رسی ژئوسینتتیک ندارد.

۱-۳- اثر شیرابه بر ضریب نفوذپذیری لایه‌های رسی و عایق‌های رسی

ژئوسینتتیک

می‌دانیم ضریب نفوذپذیری رس‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی با اندرکنش سیستم رس - سیال تحت تاثیر قرار گیرد. مواد شیمیایی زیادی تمایل به کاهش ضخامت DDL دارند که باعث انقباض توده خاک شده و باعث کاهش در نیروی دافعه و بنابراین باعث جمع شدگی ذرات رس می‌شود



شکل ۱. بنتونیت داخل یک لایه GCL تحت: (a) صفر چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی، (b) ۵ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی، (c) ۱۲ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی [۲۰]

Fig. 1. Bentonite inside the GCL: a) under 0 freeze thaw cycle, b) under 5 freez-thaw cycles and c) under 12 freeze- thaw cycles

جدول ۱. مشخصات خاک رس منطقه نازلوی ارومیه

Table 1. Characteristics of clay from Nazlou region of Urmia City

نوع خاک در سیستم متحد	حد روانی (%)	نشانه خمیری (%)	درجه رطوبت بهینه (%)	دانسیته خشک حداکثر (kg/m^3)
CL	۲۹	۱۴	۱۲	۱۸۳۰

خمی کمتری خواهند داشت و در نتیجه ضریب نفوذپذیری بیشتر خواهد بود [۲۳]. در این تحقیق اثر چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم منطقه نازلوی ارومیه و عایق‌های رسی ژئوسینتتیک تحت نفوذ آب و شیرابه و همچنین اثر میزان تنش موثر بر ضریب نفوذپذیری رس‌های متراکم تحت اثر چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی بررسی شده است. آزمایش‌ها نفوذپذیری توسط دستگاه نفوذپذیری سه محوری با دیواره انعطاف‌پذیر بر روی نمونه‌ها انجام شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح

خاک رسی به کار رفته در این تحقیق، خاک رس منطقه نازلوی ارومیه

[۲۱]. زمانی که نیروی دافعه کاهش می‌یابد، ذرات خاک تمایل به جمع شدگی داشته و در اثر نیروهای جاذبه به شکل توده متراکم در آمده و باعث افزایش خالصی در سطح مقطع موثر جریان و در نتیجه افزایش در ضریب نفوذپذیری خاک-سیال حفره‌ای می‌شود [۲۲]. میزان کاهش ضخامت DDL با افزایش غلظت یون بیشتر شده و در نتیجه باعث جمع شدگی اجزای رس و ایجاد کانال‌های حفره‌ای بزرگی می‌شود که جریان می‌تواند از میان آن اتفاق بیافتد. با عبور سیال از لایه GCL، با تورم لایه بنتونیتی، حفرات بزرگ‌تر بین ذرات بنتونیت، با ذرات جامد معدنی و مولکول‌های سیال پر می‌شوند که موجب میشود مسیرهای جریان باریک و پر پیچ و خمی پدید آید که باعث ایجاد ضریب نفوذپذیری کم می‌شود. برعکس اگر جلوی تورم گرفته شود مسیرهای جریان بین ذرات بنتونیت بزرگ‌تر شده و پیچ و

جدول ۲. نتایج آزمایش XRD روی خاک رس

Table 2. Result of XRD test on the clay

Feldspar (K)	Clay Mineral	Feldspar (Na,Ca)	CaCO ₃	SiO ₂	مواد تشکیل دهنده خاک رس
۷	۱۳	۱۹	۲۴	۳۷	درصد تشکیل دهنده

جدول ۳. مشخصات نمونه GCL مورد استفاده در این تحقیق

Table 3. Characteristics of GCL used in this study

۵۵۰۰	جرم واحد سطح (g/m ²)
۷	ضخامت (mm)
۲۰-۱۱	مقاومت کششی ماکزیمم (kN/m)
۲×۱۰ ^{-۱۱}	ضریب نفوذپذیری (m/s)

نمونه با ابعاد مورد نیاز باید GCL به نحو مناسبی برش داده شود تا از دست رفتن بنتونیت به حداقل برسد. در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های GCL، نمونه‌ها توسط یک استوانه فلزی نوک تیز به صورت خشک برش داده شدند و سپس یک لایه نازک از خمیر بنتونیت در اطراف محل برش چسبانده شده تا مانع هدر رفتن بنتونیت در حین آزمایش شود. در شکل ۲ یک نمونه GCL آماده شده برای آزمایش نشان داده شده است.

برای بررسی اثر شیرابه بر ضریب نفوذپذیری لایه‌های عایق اساس رسی به دلیل جلوگیری از تداخل یون‌ها در اندرکنش خاک و مواد آلاینده به جای شیرابه طبیعی از شیرابه مصنوعی استفاده شده است [۲۵]. برای تهیه شیرابه مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق نمونه شیرابه طبیعی تهیه شده از مدفن زباله منطقه نازلوی شهر ارومیه تحت آنالیز شیمیایی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج آنالیز شیمیایی شیرابه طبیعی، برای تهیه شیرابه مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق، جرم یون های موجود در یک لیتر آب مقطر مطابق جدول ۵ انتخاب شدند.

می باشد که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. نمونه‌های رسی مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر ۷۰ mm و ارتفاع ۵۰ mm هستند. نمونه‌های رسی در درجه رطوبت ۳٪ بیشتر از درجه رطوبت بهینه (ω=۱۵٪) و با استفاده از روش تراکم پروکتور استاندارد آماده شدند. همچنین نتایج آزمایش XRD روی خاک رس مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ نشان داده شده است. کانی غالب در خاک رسی به کار رفته در این تحقیق، کانی ایلیت می باشد که دارای نفوذپذیری کمتر از ۱۰^{-۹} m/s بوده و یک کانی مناسب برای استفاده در کارهای مهندسی، خصوصاً عایق‌های رسی می باشد [۲۴].

نمونه های GCL مورد استفاده در این تحقیق با نام تجاری BFG Bentofix® ۵۰۰۰ شامل یک لایه بنتونیت که بین یک لایه ژئوتکستایل پوششی و یک لایه ژئوتکستایل حمال قرار گرفته است، می باشند. مشخصات نمونه GCL مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳ آمده است. نمونه ها در اندازه‌های با قطر ۷۰ mm آماده شدند. نمونه گیری از GCL برای آزمایش، بدون از دست دادن بنتونیت تقریباً غیرممکن است. برای تهیه



شکل ۲. مشخصات نمونه GCL آماده شده برای آزمایش نفوذپذیری

Fig. 2. Prepared GCL for permeability tests

جدول ۴. نتایج آنالیز شیمیایی زباله منطقه نازلوی شهر ارومیه

. Result of chemical test of leachate from Nazlou region of Urmia City

آنیون یا کاتیون	K	Na	Mg ⁺²	Ca ⁺²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻²	CO ₃ ⁻²
غلظت (میلی گرم در لیتر)	۲۳۳/۲	۸۹۰۰	۱۸۲/۴	۳۵۷	۷۲۷/۷	۵۶۸	۱۵۵۵۵	۴۵۰

جدول ۵. جرم یون های موجود در ۱ لیتر آب مقطر جهت تهیه شیرابه مصنوعی

. Mass of ions in 1 liter of distilled water of synthetic leachate

مواد تشکیل دهنده	مقدار (gr)
NaHCO ₃	۲۲/۷
NaCl	۶/۷
KCl	۰/۲
MgSO ₄	۱/۸
CaCl ₂	۲/۲



شکل ۳. دستگاه نفوذپذیری سه محوری با دیواره انعطاف پذیر

Fig. 3. Triaxial flexible-wall hydraulic conductivity apparatus

اعمال چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی باید به مدت ۵ روز تحت تنش همه جانبه 3 ± 15 kPa تحت نفوذ آب قرار گیرد. سپس همانند نمونه‌های رسی تحت اثر چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی قرار می گیرد. بعد از اعمال تعداد مورد نظر از چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی نمونه مورد نظر در محفظه دستگاه نفوذپذیری سه محوری قرار گرفته و آزمایشهای نفوذپذیری بر روی نمونه ها انجام شده است. آزمایش نفوذپذیری زمانی خاتمه می‌یابد که میزان جریان ورودی با جریان خروجی برابر شود. آزمایشهای نفوذپذیری توسط دستگاه نفوذپذیری سه محوری با دیواره انعطاف‌پذیر (Tri-Flex) انجام شده‌اند که در شکل ۳ نشان داده شده است. برنامه آزمایشهای نفوذپذیری انجام شده بر روی خاک رسی و لایه‌های GCL در جدول ۶ ارائه شده است.

۳- آزمایش های نفوذپذیری

نمونه ها پس از آماده سازی، تحت تعداد مورد نظر از چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی قرار گرفتند. در طول دوره یخ زدگی- ذوب شدگی نمونه‌ها با پوشش پلاستیکی پوشانده شدند تا رطوبت نمونه در طول دوره یخ زدگی- ذوب شدگی تغییر نکند. با توجه به پیشنهاد مرجع [۱۲]، دمای یخ زدگی ۱۵- درجه سانتی‌گراد و دمای ذوب شدگی دمایی بین ۱۶ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. مدت زمان ذکر شده در این استاندارد برای هر کدام از دوره‌های یخ زدگی و ذوب شدگی ۲۴ ساعت است. بعد از اعمال چرخه‌های یخ زدگی و ذوب شدگی، نمونه مورد نظر در دستگاه نفوذپذیری سه محوری قرار گرفته و بعد از مراحل اشباع کردن نمونه، تنش همه جانبه ۱۰۰ kPa به نمونه اعمال می‌شود و سپس سیال نفوذی تحت گرادیان ۱۰ به نمونه اعمال می‌شود. نمونه‌های GCL قبل از

جدول ۶. آزمایش‌های نفوذپذیری انجام شده بر روی خاک رسی و لایه GCL

Table 6. Permeability tests on clay and GCL samples

تنش همه جانبه (kPa)	تعداد چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی							تعداد چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی	آزمایش‌های نفوذپذیری تحت تاثیر چرخه‌های یخ زدگی-ذوب شدگی
	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰		
۳۰	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز*	تحت نفوذ آب	لایه رسی
	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز		
۶۵	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	تحت نفوذ آب	لایه رسی
	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز		
۳۰	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	تحت نفوذ شیرابه	لایه رسی
	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز	۲-آز		
۳۰	-	۱۲	۸	۵	۳	۱	۰	تعداد چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی	GCL
	-	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز		
۳۰	-	-	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	تحت نفوذ آب	
۳۰	-	-	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	۱-آز	تحت نفوذ شیرابه	

* منظور از عبارت "آز" در جدول، "آزمایش" میباشد.

ضریب نفوذپذیری بر اساس قانون داری و با استفاده از رابطه ۱ [۲۶]، رابطه ۴ را برای اصلاح نتایج به دست آمده ارائه کرده است.

محاسبه می‌شود

$$K_{20} = R_T \cdot K \quad (۴)$$

که در این رابطه:

K_p : ضریب نفوذپذیری در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

R_T : نسبت ویسکوزیته آب در دمای آزمایش به ویسکوزیته آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد است و

K : ضریب نفوذپذیری مربوط به هر تست در دمای مربوط به آن آزمایش می‌باشد.

ضریب R_T با استفاده از رابطه ۵ قابل محاسبه است:

$$R_T = \frac{2.2902(0.9842^T)}{T^{0.1702}} \quad (۵)$$

که در این رابطه T میانگین دمای آزمایش می‌باشد.

T_1 : دمای آزمایش در شروع تست که با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد اندازه گرفته شده است.

T_2 : دمای آزمایش در انتهای تست که با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد اندازه گرفته شده است.

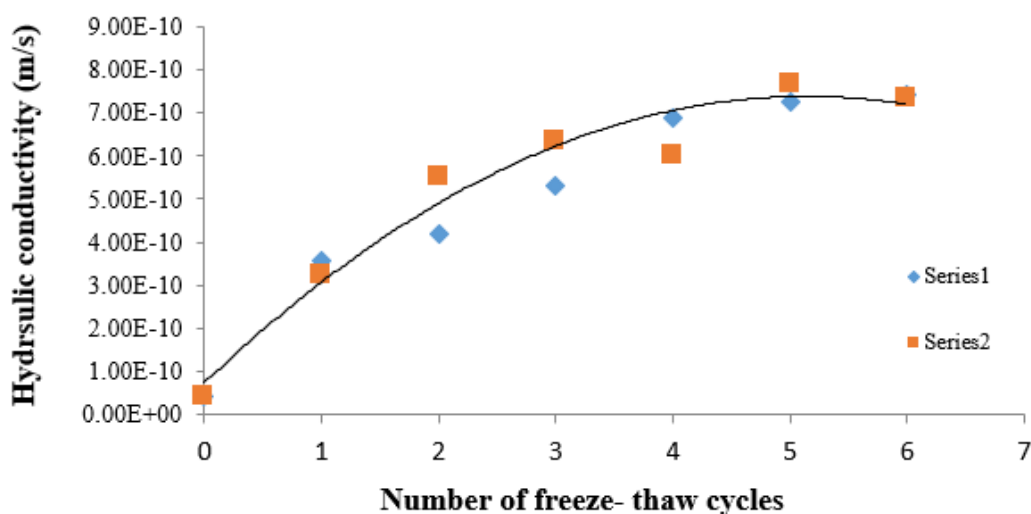
$$\frac{aL}{2At} \ln \left[\frac{P_B + h(t_1)}{P_B + h(t_2)} \right] \quad (۱)$$

$$h(t_1) = Vu(t_1) - VL(t_1) \quad (۲)$$

$$h(t_2) = Vu(t_2) - VL(t_2) \quad (۳)$$

در روابط فوق a سطح مقطع بورت دستگاه نفوذپذیری سه محوری، L ارتفاع نمونه خاک، A سطح مقطع نمونه خاک، t زمان آزمایش، P_B تنش انحرافی، h اختلاف ارتفاع آب در بورت بالایی و پایینی، $V_u(t_i)$ حجم قرائت شده در بورت بالایی در زمان t_i و $V_L(t_i)$ حجم قرائت شده در بورت پایینی در زمان t_i می‌باشند.

با توجه به اینکه روابط محاسبه ضریب نفوذپذیری برای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده‌اند و آزمایش‌های نفوذپذیری در دماهای مختلف انجام شده‌اند نتایج به دست آمده برای ضرایب نفوذپذیری باید اصلاح شوند. مرجع



شکل ۴. تغییرات ضریب نفوذپذیری رس متراکم در مقابل چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی تحت نفوذ آب

Fig. 4. Hydraulic conductivity versus number of freeze-thaw cycles for clay specimens permeated with water

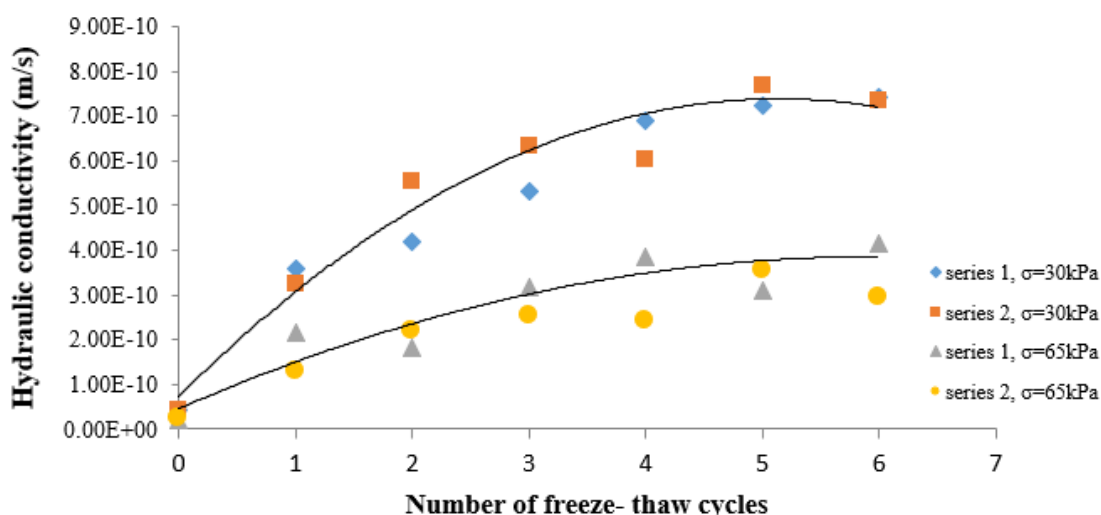
نفوذپذیری بعد از ۵ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی ثابت می‌ماند. مشاهده می‌شود نرخ افزایش در ضریب نفوذپذیری با افزایش تعداد چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان کرد که با افزایش تعداد چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی نرخ افزایش حجم حفرات کاهش می‌یابد. پس ضریب نفوذپذیری بعد از ۵ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی مقدار ماکزیمم خود را خواهد داشت. بنابراین ضریب نفوذپذیری نمونه رسی که تحت اثر ۵ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی قرار گرفته است می‌تواند برای طراحی مهندسی در مناطق سردسیر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین همانطور که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود بیشترین تغییر در ضریب نفوذپذیری بعد از اولین چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی رخ می‌دهد و می‌توان چنین نتیجه گرفت که آسیب اساسی به نمونه در طول اولین چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی رخ می‌دهد و در کل می‌توان نتیجه گرفت که ضریب نفوذپذیری خاک رسی CL در اثر چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی به صورت قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار می‌گیرد و اگر خاک رسی CL در منطقه‌ای سردسیر به عنوان لایه مانع هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد باید در مقابل اثر سرما محافظت شود.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تاثیر تعداد چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم تحت نفوذ آب

برای مشاهده اثر چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم، آزمایش‌های نفوذپذیری سه محوری بر روی خاک رسی تحت تنش موثر 30 kPa و گرادیان هیدرولیکی 10 انجام شد. برای هر چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی ۲ نمونه تحت آزمایش قرار گرفتند که نتایج تغییرات ضریب نفوذپذیری در مقابل تعداد چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی در شکل ۴ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، ضریب نفوذپذیری در ابتدا تحت اثر اولین چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی تقریباً 10 برابر می‌شود. ضریب نفوذپذیری با افزایش تعداد چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی افزایش می‌یابد اما نرخ افزایش در ضریب نفوذپذیری بعد از ۳ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که میزان افزایش در ضریب نفوذپذیری در طول چرخه دوم و سوم یخ زدگی - ذوب شدگی حدود 80% میزان افزایش در ضریب نفوذپذیری در طول چرخه اول می‌باشد و ضریب



شکل ۵. ضریب نفوذپذیری نمونه های رسی در مقابل چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی تحت تنش موثر ۳۰ kPa و ۶۵ kPa

Fig. 5. . Hydraulic conductivity versus number of freeze-thaw cycles for clay specimens for effective stresses of, 30 kPa and 65 kPa

$$B = \frac{K_n(65)}{K_n(30)} \quad (6)$$

که در این رابطه n تعداد چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی می باشد. ضرایب نفوذپذیری میانگین تحت اثر تنش های موثر ۳۰ kPa و ۶۵ kPa و همچنین مقدار پارامتر B برای چرخه های مختلف یخ زدگی- ذوب شدگی در جدول ۷ آورده شده است.

همانطور که از نتایج جدول ۷ ملاحظه می شود افزایش تنش موثر از ۳۰ kPa به ۶۵ kPa باعث می شود ضریب نفوذپذیری نمونه های رسی قرار گرفته در معرض چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی تقریباً نصف شوند.

۳-۴- تاثیر چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری عایق های رسی ژئوسینتتیک (GCLs)

برای مشاهده تاثیر چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری عایق های رسی ژئوسینتتیک، لایه های GCL آماده شده تحت اثر تنش موثر ۳۰ kPa و گرادیان هیدرولیکی ۱۰ تحت آزمایش ها نفوذپذیری سه محوری قرار گرفتند. آزمایش ها تعیین ضریب نفوذپذیری برای لایه های GCL تحت ۰، ۱، ۳، ۵، ۸ و ۱۲ چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی انجام شدند. نتایج ضرایب نفوذپذیری یک نمونه GCL مشابه با

۲-۴- اثر میزان تنش موثر بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم تحت اثر چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی

برای مشاهده اثر تنش موثر بر ضرایب نفوذپذیری نمونه های رسی قرار گرفته در معرض چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی، آزمایش ها نفوذپذیری بر روی نمونه های رسی تحت اثر تنش موثر ۶۵ kPa و گرادیان هیدرولیکی ۱۰ انجام شدند. در شکل ۵ تغییرات ضرایب نفوذپذیری در مقابل تعداد چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی برای هر دو آز آزمایش های نفوذپذیری تحت تنش موثر ۳۰ kPa و ۶۵ kPa نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می شود، اعمال تنش موثر زیاد به نمونه هایی که تحت اثر چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی قرار گرفته اند باعث کاهش نرخ افزایش در ضریب نفوذپذیری در اثر چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی می شود. به عبارتی تنش موثر بیشتر اثر مخرب چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی را تا حدودی کاهش می دهد.

برای دریافتن بهتر اثر تنش موثر بر ضریب نفوذپذیری نمونه های رسی تحت اثر چرخه های یخ زدگی- ذوب شدگی، پارامتر بی بعد B را به صورت نسبت ضریب نفوذپذیری میانگین هر چرخه تحت اثر تنش موثر ۶۵ kPa ($K_{n,65}$) به ضریب نفوذپذیری میانگین هر چرخه تحت اثر تنش موثر ۳۰ kPa ($K_{n,30}$) تعریف می کنیم که به صورت رابطه (۶) نشان داده شده است.

جدول ۷. مقادیر ضرایب نفوذپذیری میانگین و پارامتر B برای نمونه های رسی

Table 7. Average hydraulic conductivity and Dimensionless parameter B for clay samples

۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰	n
$7/38 \times 10^{-10}$	$7/47 \times 10^{-10}$	$6/46 \times 10^{-10}$	$5/83 \times 10^{-10}$	$4/87 \times 10^{-10}$	$3/41 \times 10^{-10}$	$4/18 \times 10^{-11}$	$K_{n,30}$ (m/s)
$3/54 \times 10^{-10}$	$3/33 \times 10^{-10}$	$3/13 \times 10^{-10}$	$2/86 \times 10^{-10}$	$2/01 \times 10^{-10}$	$1/72 \times 10^{-10}$	$2/13 \times 10^{-10}$	$K_{n,65}$ (m/s)
۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۵۰	۰/۵۱	B

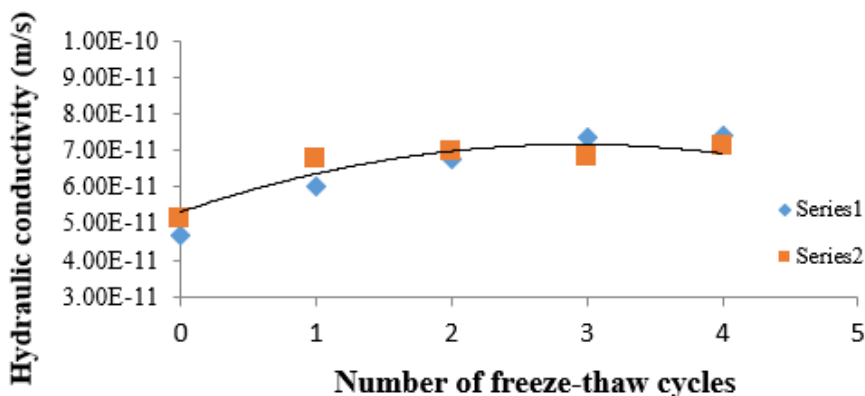
جدول ۸. ضریب نفوذپذیری لایه های GCL تحت نفوذ آب

Table 8. Hydraulic conductivity of GCL permeated with water

ضریب نفوذپذیری اصلاح شده K_{20} (m/s)	تعداد چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی
2×10^{-11}	۰
$2/26 \times 10^{-11}$	۱
$2/38 \times 10^{-11}$	۳
$2/46 \times 10^{-11}$	۵
$2/52 \times 10^{-11}$	۸
$2/57 \times 10^{-11}$	۱۲

یخ زدگی - ذوب شدگی تقریباً ۱۷ برابر ضریب نفوذپذیری نمونه رسی بود که تحت چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی قرار نگرفته بود. نتایج نشان می دهند که برخلاف نمونه های رسی، اعمال چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر نمونه های GCL ضریب نفوذپذیری این لایه ها را به طور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر قرار نمی دهد و دلیل آن را می توان در تعداد و حجم بیشتر حفرات ایجاد شده در لایه های رسی نسبت به نمونه های GCL با توجه به ساختار آن ها بیان کرد. پس اگر لایه های GCL در معرض آب و هوای سرد قرار گیرند به عملکرد خوب خود به عنوان مانع هیدرولیکی ادامه می دهند.

سایر نمونه ها بعد از هر چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی در جدول ۸ آمده است. ضریب نفوذپذیری نمونه GCL که تحت چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی قرار نگرفته بود 2×10^{-11} m/s به دست آمد. این در حالی است که ضریب نفوذپذیری نمونه GCL قرار گرفته تحت ۱۲ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی $2/57 \times 10^{-11}$ m/s به دست آمد. بنابراین افزایش کمی (در حدود ۳۵٪) در ضریب نفوذپذیری نمونه GCL قرار گرفته در معرض ۱۲ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی نسبت به نمونه GCL که تحت چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی قرار نگرفته بود به دست آمد. در حالی که برای نمونه رسی تحت اثر تنش های مشابه ضریب نفوذپذیری نمونه تحت اثر ۶ چرخه



شکل ۶. ضریب نفوذپذیری نمونه های رسی در مقابل چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی تحت نفوذ شیرابه

Fig. 6. Hydraulic conductivity versus number of freeze-thaw cycles for clay specimens permeated with leachate

نفوذپذیری لایه های رسی ژئوسینتیکی تحت نفوذ شیرابه، این نمونه ها پس از آماده سازی به مدت ۲۴ ساعت تحت نفوذ شیرابه قرار گرفتند. لایه های GCL پس از اشباع شدن با شیرابه، تحت اثر چرخه های یخ زدگی و ذوب شدگی به تعداد مورد نظر قرار گرفته و در نهایت تحت آزمایش نفوذپذیری سه محوری قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده است. برای لایه های GCL تحت نفوذ شیرابه نیز میزان افزایش ضریب نفوذپذیری افزایش چشم گیری نشان نداد و ضریب نفوذپذیری در حدود ۱۰٪ پس از ۸ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی نسبت به نمونه GCL که تحت چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی قرار نگرفته بود، افزایش یافت.

جدول ۹. ضریب نفوذپذیری لایه های GCL تحت نفوذ شیرابه

Table 9. Hydraulic conductivity of GCL permeated with leachate

تعداد چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی	ضریب نفوذپذیری اصلاح شده K_{20} (m/s)
۰	2×10^{-11}
۱	$2/26 \times 10^{-11}$
۳	$2/38 \times 10^{-11}$
۵	$2/46 \times 10^{-11}$
۸	$2/52 \times 10^{-11}$
۱۲	$2/57 \times 10^{-11}$

۴-۴- تاثیر تعداد چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم تحت نفوذ شیرابه

برای مشاهده اثر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم تحت نفوذ شیرابه، نمونه های رسی پس از آماده سازی به مدت ۲۴ ساعت تحت نفوذ شیرابه قرار گرفتند. نمونه های رسی پس از اشباع شدن با شیرابه، تحت اثر چرخه های یخ زدگی و ذوب شدگی به تعداد مورد نظر قرار گرفته و در نهایت تحت آزمایش نفوذپذیری سه محوری قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. ضریب نفوذپذیری لایه های رسی تحت نفوذ شیرابه و اعمال چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می شود افزایش چشم گیری نداشته و بعد از اعمال ۳ چرخه یخ زدگی - ذوب شدگی تقریباً ۵۰٪ نسبت به نمونه ای که تحت یخ زدگی - ذوب شدگی قرار نگرفته بود، افزایش داشت که نشان می دهد تاثیر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی تحت نفوذ شیرابه در مقایسه با نفوذ آب خیلی کمتر است. نفوذ شیرابه به نمونه رسی باعث افزایش دمای داخل نمونه شده و در نتیجه تعداد و سائز لزه های یخ ایجاد شده کاهش یافته و در نتیجه باعث می شود سائز حفرات ایجاد شده در نمونه رسی نسبت به نمونه تحت نفوذ آب کمتر باشد و در نتیجه میزان افزایش در ضریب نفوذپذیری نیز نسبت به نمونه رسی که تحت نفوذ آب قرار گرفته کمتر است.

۴-۵- تاثیر تعداد چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری

لایه های رسی ژئوسینتیکی (GCLs) تحت نفوذ شیرابه

برای مشاهده اثر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی بر ضریب

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم و عایق‌های رسی ژئوسنتتیک (GCL) تحت اثر چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی و تحت نفوذ دو سیال آب و شیرابه مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین تاثیر میزان تنش موثر بر ضریب نفوذپذیری لایه‌های رسی و عایق‌های رسی ژئوسنتتیک تحت اثر چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی بررسی شد که نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- برای مشاهده اثر چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم، آزمایش‌های نفوذپذیری سهمحوری بر روی خاک رسی تحت تنش موثر 30 kPa و گرادیان هیدرولیکی 10 انجام شد. برای هر چرخه یخ زدگی- ذوب‌شدگی 2 نمونه تحت آزمایش قرار گرفتند، ضریب نفوذپذیری در ابتدا تحت اثر اولین چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی تقریباً 10 برابر می‌شود. ضریب نفوذپذیری با افزایش تعداد چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی افزایش می‌یابد اما نرخ افزایش در ضریب نفوذپذیری بعد از 3 چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی کاهش می‌یابد و ضریب نفوذپذیری بعد از 5 چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی ثابت می‌ماند.

۲- برای مشاهده اثر تنش موثر بر ضرایب نفوذپذیری نمونه‌های رسی قرار گرفته در معرض چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی، آزمایش‌های نفوذپذیری بر روی نمونه‌های رسی تحت اثر تنش موثر 65 kPa و گرادیان هیدرولیکی 10 انجام شدند. ملاحظه شد افزایش تنش موثر از 30 kPa به 65 kPa باعث می‌شود ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی قرار گرفته در معرض چرخه‌های یخ زدگی ذوب شدگی تقریباً نصف شوند.

۳- برای مشاهده تاثیر چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری عایق‌های رسی ژئوسنتتیک، لایه‌های GCL آماده شده تحت اثر تنش موثر 30 kPa و گرادیان هیدرولیکی 10 تحت آزمایش‌ها نفوذپذیری سه محوری قرار گرفتند. آزمایش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری برای لایه‌های GCL تحت $0, 1, 3, 5, 8$ و 12 چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی انجام شدند. افزایش کمی (در حدود 35%) در ضریب نفوذ پذیری نمونه GCL قرار گرفته در معرض 12 چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی نسبت به نمونه GCL که تحت چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی قرار نگرفته بود به دست آمد. اعمال چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی بر نمونه‌های GCL ضریب نفوذپذیری این لایه‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار نمی‌دهد.

۴- برای مشاهده اثر چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی بر ضریب

نفوذپذیری خاک رسی متراکم تحت نفوذ شیرابه، نمونه‌های رسی پس از آماده سازی به مدت 24 ساعت تحت نفوذ شیرابه قرار گرفتند. نمونه‌های رسی پس از اشباع شدن با شیرابه، تحت اثر چرخه‌های یخ زدگی و ذوب شدگی به تعداد مورد نظر قرار گرفته و در نهایت تحت آزمایش نفوذپذیری سه محوری قرار گرفتند. ملاحظه شد ضریب نفوذپذیری لایه‌های رسی تحت نفوذ شیرابه و اعمال چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی، افزایش چشم‌گیری نداشته و بعد از اعمال 3 چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی تقریباً 50% نسبت به نمونه‌ای که تحت یخ زدگی- ذوب شدگی قرار نگرفته بود، افزایش داشت که نشان می‌دهد تاثیر چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی تحت نفوذ شیرابه در مقایسه با نفوذ آب خیلی کمتر است.

۵- برای مشاهده اثر چرخه‌های یخ زدگی- ذوب شدگی بر ضریب نفوذپذیری لایه‌های رسی ژئوسنتتیکی تحت نفوذ شیرابه، این نمونه‌ها پس از آماده سازی به مدت 24 ساعت تحت نفوذ شیرابه قرار گرفتند. لایه‌های GCL پس از اشباع شدن با شیرابه، تحت اثر چرخه‌های یخ زدگی و ذوب شدگی به تعداد مورد نظر قرار گرفته و در نهایت تحت آزمایش نفوذپذیری سه محوری قرار گرفتند که برای لایه‌های GCL تحت نفوذ شیرابه نیز میزان افزایش ضریب نفوذپذیری افزایش چشم‌گیری نشان نداد و ضریب نفوذپذیری در حدود 10% پس از 8 چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی نسبت به نمونه GCL که تحت چرخه یخ زدگی- ذوب شدگی قرار نگرفته بود افزایش یافت.

۶- فهرست علائم

ω	درجه رطوبت خاک
GCL	عایق رسی ژئوسنتتیکی
a	سطح مقطع بورت دستگاه نفوذپذیری سه محوری
L	ارتفاع نمونه خاک
A	سطح مقطع نمونه خاک
t	زمان آزمایش
PB	تنش انحرافی
h	اختلاف ارتفاع آب در بورت بالایی و پائینی
$(V_U(t_i))$	حجم قرائت شده در بورت بالایی در زمان
$(V_L(t_i))$	حجم قرائت شده در بورت پائینی در زمان
K_{20}	ضریب نفوذ پذیری در دمای 20 درجه سانتی‌گراد
K	ضریب نفوذپذیری در دمای آزمایش

- Range, and Forest Lands, Spokane, Wash: 145-155.
- [7] Hewitt, R. D. and Daniel, D. E. (1997). "Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners after freeze-thaw." *J. Geotech. Geoenviron. Eng* 123: 305-313.
- [8] Kraus, J. F. and Benson, C. H. (1995). "Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity of barrier materials: laboratory and field evaluation." *Research and development* 600: 95-118.
- [9] Podgorney, R. K. and Bennett, J. E. (2006). "Evaluating the long-term performance of geosynthetic clay liners exposed to freeze – thaw." *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp. 265-268.
- [10] Makusa, G. P., Sabrina L., Berns, B. E., Benson, C. H. and Knutsson, S. (2014). "Freeze-thaw cycling concurrent with cation exchange and the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners." *Canadian geotechnical journal* 51.
- [11] Zimmie, T. F., Laplante, C. M., and Bronson, D. L. (1991). "The effect of freezing and thawing on landfill covers and liners." *Proceedings, 3rd International Symposium on Cold Regions Heat Transfer. University of Alaska, Fairbanks*: 363-371.
- [12] ASTM, American Society for Testing and Materials (2008). *Standard test method for determining the effect of freeze-thaw on hydraulic conductivity of compacted or intact soil specimens using a flexible wall hydraulic conductivity apparatus. ASTM D6035-08*.
- [13] Xian, S., Lu, Z., Yao, H., Fang, R. and She, J. (2019). "Comparative study on mechanical properties of compacted clay under freeze-thaw cycles with closed and open systems." *Hindawi* 16.
- [14] Koen, B. (2014). "Effect of freeze-thaw cycles on hydraulic properties of (Boom) clay." *Belgian Nuclear Research Center*: 16.
- [15] Andersland, O. B. and Anderson, D. M. (1978). "Geotechnical engineering for cold region." *Mc Graw-Hill, New York*.
- [16] Taylor, G. S. and Luthin, J. N. (1978). "A model for نسبت ویسکوزیته آب در دمای آزمایش به ویسکوزیته آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد
- RT
- T میانگین دمای آزمایش
- T\ دمای آزمایش در شروع تست
- T\ دمای آزمایش در انتهای تست
- CL خاک رسی با خاصیت خمیری پائین
- نسبت ضریب نفوذپذیری تحت اثر تنش موثر ۶۵ kPa به ضریب نفوذپذیری تحت اثر تنش موثر ۳۰ kPa
- B
- K_{n65} ضریب نفوذپذیری میانگین چرخه nام تحت اثر تنش موثر ۶۵ kPa
- K_{n30} ضریب نفوذپذیری میانگین چرخه nام تحت اثر تنش موثر ۳۰ kPa
- n چرخه‌های یخ زدگی - ذوب شدگی

منابع

- [1] Gleason, M. H., Daniel, D. E., Eykholt, G. R. (1997). "Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123: 438.
- [2] VanGulck, J. F., Rowe, R. K., Rittmann, B. E., and Cooke, A. J. (2003). "Predicting biogeochemical calcium precipitation in landfill leachate collection systems." *Biodegradation* 14: 331-346.
- [3] Benson, C. H. and Trast, J. M. (1995). "Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays." *Clays and clay Minerals* 43: 669-681.
- [4] Othman, M. A. (1992). "Effect of freeze-thaw on the structure and hydraulic conductivity of compacted clay." *Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, U.S.A.*
- [5] Othman, M. A. and Benson, C. H. (1993). "Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity of three compacted clays from Wisconsin." *Transportation Research Record* 1369: 118-125.
- [6] Chamberlain, E. J., Iskander, I., and Hunsiker, S. E. (1990). "Effect of freeze-thaw on the permeability and macrostructure of soils." *Proceedings of International Symposium on Frozen soil Impacts on Agricultural,*

- [22] Daniel D. E., and Liljestrand H. M. (1984). "Effect of landfill leachates on natural liner systems." Geotechnical Engineering Report 83.
- [23] Bannour H., Touze-Foltz N., and Pierson P. (2016). "Transient hydraulic behavior of two GMBs-GCLs composite liners." Geotextiles and Geomembranes 44: 51-58.
- [24] Badv, K. (2018). Environmental Geotechnics. Urmia, I.R. Iran, Urmia University Publication Centre, 519 p.
- [25] Badv K., and Omidi A. (2007). "Effect of synthetic leachate on the hydraulic conductivity of clayey soil in Urmia city landfill site." Iranian journal of science & technology, Transaction B, Engineering 31: 535-545.
- [26] ASTM, American Society for Testing and Materials (2010). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM D5084-10.
- coupled heat and moisture transfer during soil freezing." Canadian geotechnical journal 15: 548-555.
- [17] Williams, P. J. and Perfect, E. (1980). "Investigation of thermally actuated water migration in frozen soils." Geotechnical Science Laboratories, Department of Geography, Carleton University, Ottawa.
- [18] Benson, C. H. and Othman, M. A. (1993). "Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ." ASCE Journal of Geotechnical Engineering 119: 276-294.
- [19] Penner, E. (1957). "Soil moisture tension and ice segregation." Highway Research Board, Bulletin 168: 50-64.
- [20] Rowe, R. K., Mukunoki, T., and Bathurst, R. J. (2008). "Hydraulic conductivity to jet-A1 of GCLs after up to 100 freeze-thaw cycles." Geotechnique 58: 503-511.
- [21] Bowders, J. J. and Daniel, D. E. (1987). "Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals." J. Geotech. ENG.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Gholikhania, K. Badvb, Effect of leachate and freeze-thaw on the hydraulic conductivity of clayey barriers, Amirkabir J. Civil Eng., 53(12) (2022) 5535-5548.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18909.6994

