

## اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم و عایق رسی ژئوسینتتیک

کاظم بدو<sup>۱\*</sup> و مهدی قلیخانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۵/۰۵

<sup>۱</sup> - استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: k.badv@urmia.ac.ir

### چکیده

اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک‌های رسی متراکم و عایق‌های رسی ژئوسینتتیک موضوع اساسی در طراحی سیستم‌های مانع انتقال در سازه‌های ذخیره آب و مدفن‌های زباله شهری می‌باشد. در این تحقیق اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم منطقه نازلوی ارومیه و عایق رسی - ژئوسینتتیک و همچنین تأثیر میزان تنش مؤثر در این چرخه‌ها بر نرخ تغییر ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی بررسی شد. دستگاه تعیین ضریب نفوذپذیری سه محوری با دیواره انعطاف‌پذیر برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌های قرار گرفته در معرض چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد در طول دوره یخ‌زدگی عدسی‌های یخی شکل گرفته در خاک و ذوب شدن دوباره آن باعث ایجاد یک شبکه مشخص از ترک‌ها در خاک در نتیجه افزایش ضریب نفوذپذیری می‌شود. افزایش تنش مؤثر باعث می‌شود نرخ افزایش ضریب نفوذپذیری بر اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی کاهش یابد. نتایج نشان داد بر خلاف خاک‌های رسی، در عایق‌های رسی ژئوسینتتیک چرخه‌های متناوب یخ‌زدگی و ذوب‌شدگی تأثیر چندانی بر تغییر ضریب نفوذپذیری این لایه‌ها نداشتند. بنابراین، زمانی که این لایه‌ها در شرایط آب و هوایی سخت قرار گیرند به عملکرد خوب خود به عنوان یک مانع هیدرولیکی ادامه می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: ذوب‌شدگی، رس متراکم، ضریب نفوذپذیری، عایق رسی - ژئوسینتتیک، یخ‌زدگی

## Effect of Freeze - Thaw Cycles on Hydraulic Conductivity of Compacted Clayey Soil and Geosynthetic Clay Liner (GCL)

K Badv<sup>\*1</sup> and M Gholikhani<sup>2</sup>

Received: 27 August 2012 Accepted: 27 July 2013

<sup>1</sup>-Prof., Dept. of Civil Engin., Univ. of Urmia. Iran

<sup>2</sup>-M.Sc. Student, Dept. of Civil Engin., Univ. of Urmia. Iran

\*Corresponding Author Email: k.badv@urmia.ac.ir

### Abstract

The effect of freeze-thaw cycles on hydraulic conductivity (HC) of compacted clay liner (CCL) and geosynthetic clay liners (GCLs) in water retaining structures and municipal solid waste landfills is a key issue in designing barrier systems in those structures. In this study the effect of freeze-thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey soil from Nazlou Region of Urmia City and a geosynthetic clay liner; and the impact of effective stress on the hydraulic conductivity change of clayey soil in these cycles were investigated. A flexible-wall triaxial hydraulic conductivity apparatus was used to measure the HC of the specimens subjected to freeze-thaw cycles. During the freezing process ice lenses grow in soil sample and when the ice lenses melt, a network of cracks is left and the HC increases. Increasing the effective stress reduces the increased hydraulic conductivity due to freeze-thaw cycles. The results show that on the contrary to compacted clayey soil, the application of intermittent freeze-thaw cycles does not significantly affect the HC of GCL even when GCL sample is subjected to extreme climatic conditions during which it continues to exhibit good performance as a hydraulic barrier.

**Keywords:** Compacted clay, Freeze-thaw cycles, Geosynthetic clay liner, Hydraulic conductivity

مصالح طبیعی نیز به نوبه خود مشکلات خاصی را دارند که از جمله نزدیک نبودن منابع قرضه به محل اجرای پروژه، بالا رفتن هزینه حمل و نقل، نیاز به تخصص در اجرای صحیح و مشکلاتی که بر اثر عوامل جوی یا طبیعت ذاتی این مصالح وجود دارد، باعث شده است این مصالح با رضایت کامل مورد استفاده قرار نگیرند.

در مناطق سردسیر لاینرهای رسی و عایق‌های رسی ژئوسینتتیک ممکن است در طول فصل سرما در

### مقدمه

رفتار آب در خاک به دلیل ایجاد مشکلات فراوان در بیشتر اوقات باعث جلب نظرها گردیده است. کنترل نشت و ایجاد مانع هیدرولیکی یکی از مسائل مهم در مهندسی عمران می‌باشد. دانشمندان کوشیده‌اند تا راه حل مناسبی در این مورد پیدا کنند. هزینه بالای مصالح عایق مصنوعی و غیراقتصادی بودن استفاده از آنها در پروژه‌های بزرگ باعث شده است تا مصالح با نفوذپذیری کم طبیعی، بیشتر مورد توجه قرار گیرند.

دوره یخ‌زدگی در خاک رسی شکل گرفتند نسبت دادند. هویت و دانیل (۱۹۹۷) گزارش کردند که ضریب نفوذپذیری یک لایه GCL نسبت به آب، بعد از یک تا سه چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی تغییر نکرد. کراس و بنسن (۱۹۹۷) نشان دادند که ضریب نفوذپذیری برای یک لایه GCL که در معرض تا ۲۰ چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار گرفته بود افزایش پیدا نکرد. پدگوتتری و بنت (۲۰۰۶) با انجام آزمایش‌های نفوذپذیری بر یک لایه GCL سوزن دوزی شده با بنتونیت سدیمی، تا ۱۵۰ چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی نشان دادند که این لایه می‌تواند حداقل ۱۵۰ چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی را بدون اینکه افزایش قابل توجهی در ضریب نفوذپذیری نسبت به آب داشته باشد، دوام بیاورد.

سیستم‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی به دو شکل یک بعدی و سه بعدی می‌تواند به نمونه‌ها اعمال شود (ASTM D6035-08) (بی‌نام ۲۰۰۸). در سیستم یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی یک بعدی اطراف نمونه مورد نظر، با عایق پشم شیشه پوشانده می‌شود و نمونه از اطراف با محیط مجاور تبادل دمایی ندارد و فقط در بعد طولی (از سطح بالایی و پایینی نمونه) با محیط تبادل دمایی دارد ولی در سیستم یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی سه بعدی نمونه مورد نظر در طول چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی فاقد عایق پشم شیشه بوده و نمونه آزادانه با محیط تبادل دمایی دارد. زیمی و همکاران (۱۹۹۱) برای مقایسه اثر دو نوع سیستم یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی یک بعدی و سه بعدی، دو نمونه رسی با ویژگی‌های مشابه را در درجه رطوبت‌های مختلف تحت اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی یک بعدی و سه بعدی قرار دادند و سپس آزمایش‌های نفوذپذیری بر روی این دو نمونه انجام شد. نتایج نشان داد که ضریب نفوذپذیری بدست آمده برای این دو نمونه تقریباً یکسان بود.

پدیده یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ساختار خاک‌ها مؤثر است. هنگامی که دمای خاک به کمتر از صفر درجه سلسیوس کاهش می‌یابد، ذرات آب موجود در منافذ خاک سرد شده و یخ تشکیل می‌گردد. بر اثر این تغییر فاز، ساختار کریستالی شش ضلعی آب نزدیک به ۹ درصد منبسط می‌شود. این ذرات کریستالی تا زمانی

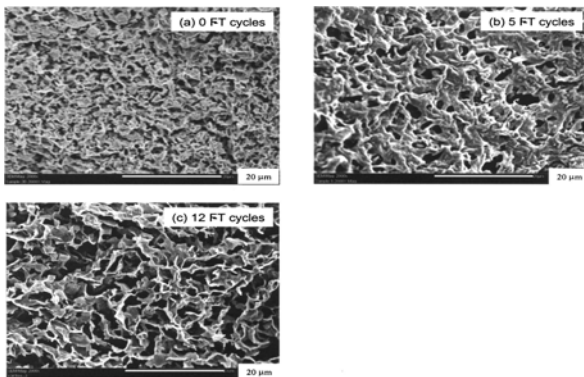
معرض چرخه‌های متناوب یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار گیرند. بنابراین، بررسی تأثیر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری این لایه‌ها می‌تواند دارای اهمیت باشد. اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم و عایق‌های رسی ژئوسینتتیک (GCL<sup>1</sup>) در سازه‌های نخیره آب و لندفیل - های زباله شهری موضوع اساسی در طراحی سیستم - های مانع انتقال در این سازه‌ها می‌باشد. از آنجا که هدف اصلی از کاربرد این لایه‌ها در سازه‌های ذکر شده به حداقل رساندن نفوذ مایعات است، ضریب نفوذپذیری پایین برای این لایه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، بررسی پارامترهایی که نفوذپذیری این لایه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد نیز اهمیت می‌یابد.

اتمن (۱۹۹۲) با ارزیابی اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری ۱۴ خاک رسی که در ساختمان، پلاستیسیته و مشخصات تراکم با هم تفاوت داشتند، نشان دادند که در نتیجه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی ضریب نفوذپذیری تا ۱۴۰۰ برابر افزایش می‌یابد. شدت افزایش در ضریب نفوذپذیری برای خاک رسی که دارای ضریب نفوذپذیری اولیه کمتری بودند، بیشتر بود. برای خاک‌های رسی با ضریب نفوذپذیری نسبتاً بالا (بیشتر از  $1 \times 10^{-8}$  m/s)، اثر یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی حداقل بود. اتمن و بنسون (۱۹۹۳) اثر تراکم و شرایط خارجی (گرادیان دمایی، دمای نهایی، شدت یخ‌زدگی و تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی) را بر ضریب نفوذپذیری سه خاک رسی متراکم با ویژگی‌های متفاوت بررسی و مشاهده کردند که گرادیان دمایی و تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بیشترین اثر را روی ضریب نفوذپذیری داشتند. چمبرلین و همکاران (۱۹۹۰) عکس‌هایی از مقاطع نازک رس متراکم یخ زده را ارائه کردند. این عکس‌ها عدسی‌های یخ با ضخامت حدود ۲۵ mm / که به صورت موازی با جبهه یخ‌زده شکل گرفته بودند را در فواصل حدود ۱/۵ mm نشان دادند. ایشان افزایش ضریب نفوذپذیری رس متراکم بر اثر یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی را به شبکه‌ای از ترک‌ها که در طول

<sup>1</sup> Geosynthetic clay liner

تصاویر حفرات بنتونیت هستند. برای نمونه‌ای که تحت یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار نگرفته است اندازه حفرات تقریباً  $1 \mu\text{m}$  تا  $2 \mu\text{m}$  است که به صورت یکنواخت گسترده شده‌اند. برای نمونه‌های قرار گرفته در معرض چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی اندازه این حفرات تقریباً  $3 \mu\text{m}$  تا  $6 \mu\text{m}$  است (رو و همکاران ۲۰۰۸).

در این تحقیق اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم منطقه نازلوی ارومیه و عایق‌های رسی ژئوسینتتیک و همچنین اثر میزان تنش مؤثر بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم تحت اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بررسی گردید.



شکل ۱- بنتونیت داخل یک لایه GCL تحت: (a) بدون چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی، (b) پنج چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی، و (c) دوازده چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی (رو و همکاران ۲۰۰۸).

### مواد و روش‌ها

#### مشخصات مصالح

خاک رسی به کار رفته در این تحقیق، خاک رس منطقه نازلوی ارومیه می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه رسی مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر  $100 \mu\text{m}$  و ارتفاع  $117 \text{ mm}$  و رطوبت  $17\%$  درصد بوده که  $3\%$  درصد بیشتر از رطوبت بهینه تراکم ( $w = 14\%$ ) است و با استفاده از روش تراکم پروکتور استاندارد تهیه شدند (ASTM-D698-78) (بی‌نام ۱۹۹۰).

که ذرات کریستالی دیگر مانع شوند یا به ذرات جامد خاک نزدیک شوند، رشد می‌کنند (اندرسلند و اندرسن ۱۹۷۸). زمانی که دمای سطح خاک کمتر از صفر درجه سلسیوس است یک جبهه یخ‌زده در سطح خاک شکل می‌گیرد (تیلور و لوتین ۱۹۷۸). یخ‌زدگی آب باعث افزایش فشار یخ و کاهش فشار آب حفره‌ای می‌شود. به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ای در جبهه یخ‌زده آب از لایه‌های زیرین به طرف مرزهای یخ زده و درون خاک - های یخ‌زده حرکت می‌کند حتی اگر خاک هیچ راه دسترسی به آب‌های خارجی نداشته باشد (ویلیامز و پرفکت ۱۹۸۰). وقتی که این آب به جبهه یخ‌زده رسید در اثر تبادل دمایی با جبهه یخ‌زده این آب نیز یخ می‌زند و به این ترتیب جبهه یخ‌زده از سطح خاک به سمت لایه - های درونی حرکت می‌کند. فشار آب حفره‌ای منفی بزرگ و حرکت آب باعث می‌شود ترکهای انقباضی در خاک زیر جبهه یخ‌زده در جهت قائم شکل بگیرند. با پیشروی جبهه یخ‌زده این ترکها با یخ پر می‌شوند اما بعد که یخها ذوب می‌شوند ترکها مجرای برای جریان آب می‌شوند (بنسن و اتمن ۱۹۹۳). کثرت و اندازه عدسی‌های یخ بستگی به بزرگی نسبی نرخ یخ‌زدگی و در دسترس بودن آب دارد. در یک گرادیان دمایی کوچک پیشروی جبهه یخ‌زده آرامتر است و بنابراین آب زمان بیشتری برای جمع شدن در یک مکان ثابت را دارد و از اینرو عدسی‌های یخ ضخیم‌تری شکل می‌گیرند. با افزایش نرخ یخ‌زدگی (یا افزایش گرادیان دمایی) زمان کمتری برای رشد عدسی‌های یخ وجود دارد و جبهه یخ زده به سرعت پیشروی می‌کند. بنابراین، عدسی‌های یخ بیشتری با ضخامت و فواصل کوچکتر و در نتیجه ترکهای بیشتری برای اینکه در آنها جریان آب اتفاق بیافتد شکل می‌گیرند و ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد (پنر ۱۹۵۷). رو و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که پدیده یخ زدگی - ذوب‌شدگی دارای تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ساختار عایق‌های رسی ژئوسینتتیک نمی‌باشد. در شکل ۱ عکس‌های با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر از بنتونیت داخل نمونه‌های GCL که تحت ۰، ۵ و ۱۲ چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار گرفته نشان داده شده است. نواحی سیاه رنگ در



شکل ۲- نمونه GCL آماده شده برای آزمایش نفوذپذیری.

#### آزمایش‌های نفوذپذیری

نمونه‌های خاک پس از آماده‌سازی، به صورت سه‌بعدی تا ۶ چرخه تحت اثر سیستم یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار گرفتند. در طول مرحله یخ‌زدگی نمونه‌ها در یک سیستم بسته تحت اثر یخ‌زدگی قرار داشتند (ASTM-D6035-08) (بی‌نام ۲۰۰۸). در یک سیستم بسته، نمونه در طول مرحله یخ‌زدگی به هیچ منبع آب خارجی دسترسی ندارد. در طول دوره یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی نمونه‌ها با پوشش پلاستیکی پوشانده شدند تا رطوبت نمونه در طول دوره یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی تغییر نکند. با توجه به پیشنهاد استاندارد ASTM-D6035-08، دمای یخ‌زدگی ۱۵- درجه سلسیوس و دمای ذوب‌شدگی بین ۱۶ تا ۲۷ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد (بی‌نام ۲۰۰۸). مدت زمان ذکر شده در این استاندارد برای هر کدام از دوره‌های یخ‌زدگی و ذوب‌شدگی ۲۴ ساعت است.

نمونه‌های GCL قبل از اعمال چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی به مدت ۵ روز با اعمال تنش همه جانبه  $15 \pm 3$  کیلوپاسکال (ASTM-D6035-08) تحت نفوذ آب قرار و سپس همانند نمونه‌های رسی تحت اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار گرفتند (بی‌نام ۲۰۰۸). بعد از اعمال تعداد مورد نظر از چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی، نفوذپذیری نمونه‌ها در دو تکرار با استفاده از دستگاه نفوذپذیری سه محوری با دیواره انعطاف‌پذیر (Tri-Flex 2)، اندازه‌گیری گردید. آزمایش نفوذپذیری تا زمانی که میزان جریان ورودی با جریان خروجی برابر شود، ادامه یافت.

#### جدول ۱- ویژگی‌های خاک رس.

مقدار	ویژگی
CL	بافت خاک براساس سیستم متحد
۲۷	حد روانی (%)
۱۶	حد خمیری (%)
۱۱	نشانه خمیری (%)
۱۴	درجه رطوبت بهینه تراکم (%)
۱۸۳۰	چگالی خشک حداکثر ( $\text{kg/m}^3$ )

نمونه GCL مورد استفاده در این تحقیق با نام تجاری Bentofix® BFG 5000 شامل یک لایه بنتونیت است که بین یک لایه ژئوتکستایل پوششی و یک لایه ژئوتکستایل حمال قرار دارد. مشخصات نمونه GCL مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ آمده است. نمونه‌ها در اندازه‌های با قطر ۷۰ میلی‌متر آماده شدند. نمونه‌گیری از GCL برای آزمایش، بدون از دست دادن بنتونیت تقریباً غیرممکن است. برای تهیه 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 هدررفتن بنتونیت در حین آزمایش شود. در شکل ۲ یک نمونه GCL آماده شده برای آزمایش نشان داده شده است.

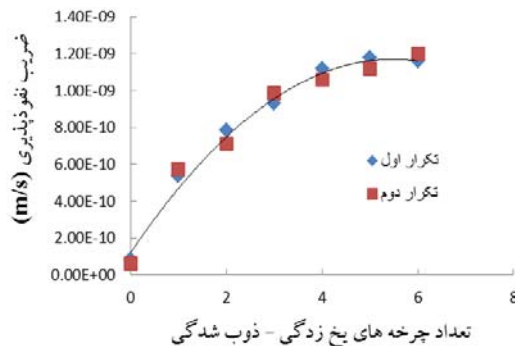
#### جدول ۲- ویژگی‌های نمونه GCL.

مقدار	ویژگی
۵۵۰۰	جرم واحد سطح ( $\text{g/m}^2$ )
۷	ضخامت (mm)
۲-۱۱	مقاومت کششی حداکثر (kN/m)
$2 \times 10^{-11}$	ضریب نفوذپذیری (m/s)

### نتایج و بحث

تأثیر تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم

اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم در دو تکرار، در تنش مؤثر ۳۰ kPa و گرادیان هیدرولیکی ۱۰ در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات ضریب نفوذپذیری رس متراکم در مقابل چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی

بیشترین تغییر ضریب نفوذپذیری بعد از اولین چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی رخ می‌دهد. ضریب نفوذپذیری در ابتدا تحت اثر اولین چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی تقریباً ۱۰ برابر می‌شود. به نظر می‌رسد که آسیب اساسی به نمونه در طول اولین چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی رخ می‌دهد اما نرخ افزایش در ضریب نفوذپذیری بعد از ۳ چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی کاهش می‌یابد و بعد از ۵ چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بعد از رسیدن به یک مقدار حداکثر ثابت می‌ماند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که ضریب نفوذپذیری نمونه رسی که تحت اثر ۵ چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار گرفته است قابل استفاده برای طراحی‌های مهندسی در مناطق سردسیر است. اتمن و بنسون (۱۹۹۲) به نتیجه مشابهی دست یافتند. در کل می‌توان نتیجه گرفت که ضریب نفوذپذیری خاک رسی (CL) بر اثر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی به صورت قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر 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. تغییرات بوجود آمده

در آزمایش نفوذپذیری سه محوری، ضریب نفوذپذیری بر اساس قانون داریسی و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$K = \frac{aL}{2At} \ln \left[ \frac{P_B + h(t_1)}{P_B + h(t_2)} \right] \quad [1]$$

$$h(t_1) = V_u(t_1) - V_L(t_1) \quad [2]$$

$$h(t_2) = V_u(t_2) - V_L(t_2) \quad [3]$$

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 پائینی،  $V_u(t_i)$  حجم قرائت شده در بورت بالایی در زمان  $t_i$  و  $V_L(t_i)$  حجم قرائت شده در بورت پائینی در زمان  $t_i$  می‌باشند.

با توجه به اینکه روابط محاسبه ضریب نفوذپذیری برای دمای ۲۰ درجه سلسیوس ارائه و آزمایش‌های نفوذپذیری در دماهای مختلف انجام شده‌اند، لازم است نتایج بدست آمده برای ضرایب نفوذپذیری اصلاح شوند. استاندارد ASTM-D5084، رابطه زیر را برای اصلاح نتایج بدست آمده ارائه کرده است (بی‌نام ۲۰۱۰):

$$K_{20} = R_T \cdot K \quad [4]$$

در این رابطه  $K_{20}$  ضریب نفوذپذیری در دمای ۲۰ درجه سلسیوس،  $R_T$  نسبت ویسکوزیته آب در دمای آزمایش به ویسکوزیته آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس است و  $K$  ضریب نفوذپذیری مربوط به هر آزمایش در دمای مربوط به آن آزمایش می‌باشد. ضریب  $R_T$  با استفاده از رابطه ۵ قابل محاسبه است:

$$R_T = \frac{2.2902(0.9842^T)}{T^{0.1702}} \quad [5]$$

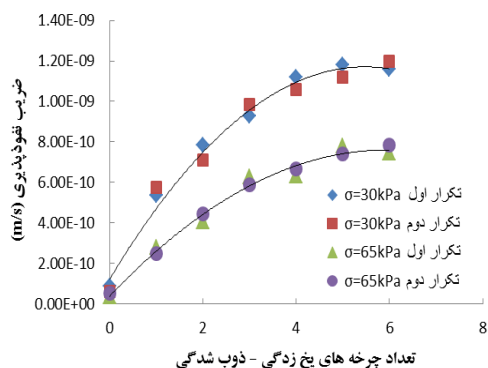
در این رابطه  $T$  میانگین دمای آزمایش  $(T = \frac{T_1 + T_2}{2})$ ،  $T_1$  و  $T_2$  به ترتیب دما در شروع و در انتهای آزمایش هستند که با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس اندازه گرفته شده‌اند.

دارای رابطه نزدیک بوده و هر دو فرایند از یک مکانیزم مشابه پیروی می‌کنند.

اثر تنش مؤثر بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم تحت اثر چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی

تغییرات ضریب نفوذپذیری در مقابل تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی برای هر دو آزمایش نفوذپذیری تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa و ۶۵ kPa در شکل ۵ نشان داده شده است. اعمال تنش مؤثر زیاد به نمونه‌هایی که تحت اثر چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی قرار گرفته‌اند باعث کاهش نرخ افزایش در ضریب نفوذپذیری در اثر چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی می‌شود. به عبارتی تنش مؤثر بیشتر اثر مخرب چرخه‌های یخ-زدگی-ذوب‌شدگی را تا حدودی کاهش می‌دهد.

برای بررسی بیشتر اثر تنش مؤثر بر ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی تحت اثر چرخه‌های یخ‌زدگی



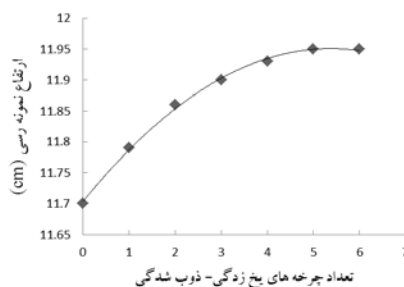
شکل ۵- ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی در مقابل چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa و ۶۵ kPa

ذوب‌شدگی، از پارامتر B استفاده می‌گردد. این پارامتر نشان دهنده تغییرات نفوذپذیری در هر چرخه بر اثر تغییرات تنش احتمالی است. پارامتر بی بعد B به صورت نسبت ضریب نفوذپذیری میانگین هر چرخه تحت اثر تنش مؤثر ۶۵ kPa ( $K_{n,65}$ ) به ضریب نفوذپذیری میانگین هر چرخه تحت اثر تنش مؤثر ۳۰ kPa ( $K_{n,30}$ ) تعریف می‌گردد (بنسون و اتمن ۱۹۹۳):

$$B = \frac{K_{n,65}}{K_{n,30}} \quad [6]$$

در ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی را می‌توان با توجه به مکانیسم چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی و افزایش حجم حفرات نمونه‌های رسی توجیه کرد. اتمن و بنسون (۱۹۹۳) و کراس و بنسن (۱۹۹۷) به نتایج مشابهی دست یافتند.

دلیل اصلی افزایش ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی بر اثر چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی، افزایش حجم آب داخل نمونه رسی در اثر یخ زدن آن و در نتیجه افزایش حجم حفرات خاک است. به همین دلیل برای مشاهده اثر چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی بر حجم نمونه و همچنین مشاهده رابطه بین افزایش حجم نمونه با افزایش ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی، یک نمونه رسی با خواص فیزیکی مشابه با سایر نمونه‌های رسی که تحت آزمایش‌های نفوذپذیری سه محوری قرار گرفتند، تهیه شد و تغییرات ارتفاع نمونه به عنوان معرفی از تغییرات حجم نمونه، بعد از هر چرخه یخ-زدگی-ذوب‌شدگی اندازه‌گیری و ثبت شد. تغییرات ارتفاع نمونه در مقابل تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- تغییرات ارتفاع نمونه رسی در مقابل چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی.

همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود ارتفاع نمونه با افزایش تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی افزایش می‌یابد اما مشابه با نرخ افزایش نفوذپذیری، نرخ افزایش ارتفاع نیز بعد از ۳ چرخه کاهش می‌یابد و بعد از چرخه پنجم دیگر تغییری در ارتفاع نمونه مشاهده نمی‌شود. مقایسه شکل ۴ با شکل ۳ نشان می‌دهد تغییرات حجم نمونه با تغییرات ضریب نفوذپذیری

کاهش می‌یابد. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است تغییرات پارامتر B مستقل از تغییرات چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی می‌باشد. لیکن مقادیر پارامتر B در هر چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی نشان‌دهنده نسبت کاهش ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی با افزایش تنش مؤثر از ۳۰ kPa به ۶۵ kPa می‌باشد.

تأثیر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری عایق رسی ژئوسینتتیک

تأثیر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری عایق رسی ژئوسینتتیک تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa و گرادیان هیدرولیکی ۱۰، به همراه ضخامت یک نمونه GCL در جدول ۴ نشان داده شده است.

در این رابطه، n تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی می‌باشد.

میانگین ضرایب نفوذپذیری در تنش‌های مؤثر ۳۰ kPa و ۶۵ kPa و همچنین مقدار پارامتر B برای چرخه‌های مختلف یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی در جدول ۳ نشان داده شده است. با افزایش تنش مؤثر از ۳۰ kPa به ۶۵ kPa ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی در چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی کاهش نشان داد. این کاهش در ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی، بر اثر افزایش تنش مؤثر را می‌توان با کاهش حجم حفرات این نمونه‌ها بر اثر اعمال تنش توجیه کرد. با افزایش تنش مؤثر اعمال شده بر نمونه‌های رسی حجم حفرات خاک کاهش یافته و در نتیجه ضریب نفوذپذیری این نمونه‌ها

جدول ۳- میانگین ضریب نفوذپذیری و پارامتر B برای نمونه‌های رسی.

پارامترها	تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی						
N	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
$K_{n,30}$ (m/s)	$7/37 \times 10^{-11}$	$5/57 \times 10^{-11}$	$7/49 \times 10^{-11}$	$9/58 \times 10^{-11}$	$1/09 \times 10^{-9}$	$1/15 \times 10^{-9}$	$1/18 \times 10^{-9}$
$K_{n,65}$ (m/s)	$4/43 \times 10^{-11}$	$2/46 \times 10^{-11}$	$4/26 \times 10^{-11}$	$6/07 \times 10^{-11}$	$6/5 \times 10^{-11}$	$7/61 \times 10^{-11}$	$7/65 \times 10^{-11}$
B	۰/۶	۰/۴۷	۰/۵۶	۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۶۴

بر نمونه‌های GCL، ضریب نفوذپذیری این لایه‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و اگر این لایه‌ها در معرض آب و هوای سرد قرار گیرند به عملکرد خوب خود به عنوان مانع هیدرولیکی ادامه می‌دهند. پدگوتتری و بنت (۲۰۰۶) و رو و همکاران (۲۰۰۸) به نتایج تقریباً مشابهی دست یافتند.

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری روی نمونه عایق‌های GCL.

ضخامت نمونه (mm)	تعداد چرخه‌های ضریب نفوذپذیری اصلاح شده $K_{20}$ یخ‌زدگی - ذوب - اصلاح شده $K_{20}$ (m/s)	ضخامت نمونه (mm)
۶/۸	$2 \times 10^{-11}$	۰
۷/۹	$2/13 \times 10^{-11}$	۱
۸/۶	$2/34 \times 10^{-11}$	۳
۹/۲	$2/51 \times 10^{-11}$	۵
۹/۸	$2/57 \times 10^{-11}$	۸
۱۰/۱	$2/68 \times 10^{-11}$	۱۲

تأثیر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری عایق رسی ژئوسینتتیک

تأثیر چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی بر ضریب نفوذپذیری عایق رسی ژئوسینتتیک تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa و گرادیان هیدرولیکی ۱۰، به همراه ضخامت یک نمونه GCL در جدول ۴ نشان داده شده است. ضریب نفوذپذیری نمونه GCL که در معرض چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار نداشت برابر با  $2 \times 10^{-11}$  m/s بدست آمد. این در حالی است که ضریب نفوذپذیری نمونه GCL که در معرض ۱۲ چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار داشت با نزدیک به ۳۵ درصد افزایش به  $2/68 \times 10^{-11}$  m/s رسید در حالیکه برای نمونه رسی بدون عایق در تنش‌های مشابه ضریب نفوذپذیری در ۶ بار چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی تقریباً ۱۶ برابر ضریب نفوذپذیری نمونه رسی بود که تحت چرخه یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی قرار نگرفته بود. نتایج نشان داد که برخلاف نمونه‌های رسی، اعمال چرخه‌های یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی



## نتیجه‌گیری کلی

نفوذپذیری این لایه‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

نتایج بدست آمده از این مطالعه را بصورت زیر

می‌توان خلاصه نمود:

فهرست علائم	
$\omega$	درجه رطوبت خاک
GCL	عایق رسی ژئوسینتتیک
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 پائینی
$V_u(t_i)$	حجم قرائت شده در بورت بالایی در زمان $t_i$
$V_L(t_i)$	حجم قرائت شده در بورت پائینی در زمان $t_i$
$K_{20}$	ضریب نفوذپذیری در دمای ۲۰ درجه سلسیوس
K	ضریب نفوذپذیری در دمای آزمایش
	نسبت ویسکوزیته آب در دمای آزمایش
$R_T$	به ویسکوزیته آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس
T	میانگین دمای آزمایش
$T_1$	دمای آزمایش در شروع آزمایش
$T_2$	دمای آزمایش در انتهای آزمایش
CL	خاک رسی با خاصیت خمیری پائین
	نسبت ضریب نفوذپذیری تحت اثر تنش مؤثر
	۶۵ kPa به ضریب نفوذپذیری تحت اثر تنش مؤثر
B	۳۰ kPa
	ضریب نفوذپذیری میانگین چرخه $n$ م تحت اثر
$K_{n,65}$	تنش مؤثر ۶۵ kPa
	ضریب نفوذپذیری میانگین چرخه $n$ م تحت اثر
$K_{n,30}$	تنش مؤثر ۳۰ kPa
n	تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی

۱- ضریب نفوذپذیری خاک رس متراکم بر اثر اعمال چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی افزایش می‌یابد و بعد از ۵ چرخه یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی به مقدار حداکثر خود می‌رسد.

۲- ضریب نفوذپذیری نمونه رسی که تحت اثر ۵ چرخه یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی قرار گرفته است می‌تواند برای طراحی مهندسی در مناطق سردسیر مورد استفاده قرار گیرد.

۳- بیشترین تغییر در ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی بعد از اولین چرخه یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی رخ می‌دهد.

۴- تنش مؤثر بیشتر، اثر مخرب چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی را تا حدودی کاهش داده و باعث کاهش ضریب نفوذپذیری در یک چرخه مشخص می‌شود.

۵- تغییرات حجم نمونه با چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی دقیقاً همانند تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی بود که نشانگر رابطه میان حجم نمونه با ضریب نفوذپذیری آن است.

۶- افزایش کمی (در حدود ۳۵٪) در ضریب نفوذپذیری نمونه GCL قرار گرفته در معرض ۱۲ چرخه یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی نسبت به نمونه GCL که تحت چرخه یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی قرار نگرفته بود بدست آمد.

۷- برخلاف نمونه‌های رسی، اعمال چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی بر نمونه‌های GCL ضریب

## منابع مورد استفاده

- Andersland OB and Anderson DM, 1978. Geotechnical Engineering for Cold Region. Mc Graw-Hill, New York.  
Anonymous, 1990. Standard test method for soil compaction, Proctor method. American Society for Testing and Materials (ASTM) D698-78, USA.

- Anonymous, 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. American Society for Testing and Materials (ASTM) D6035-08, USA.
- Anonymous, 2010. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. American Society for Testing and Materials (ASTM) D5084-10, USA.
- Benson CH and Othman MA, 1993. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering* 119: 276-294.
- Chamberlain EJ Iskander I and Hunsiker SE, 1990. Effect of freeze-thaw on the permeability and macrostructure of soils. Pp. 145-155. *Proceedings of International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agricultural Range and Forest Lands*, Spokane, Washington, USA.
- Hewitt RD and Daniel DE, 1997. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners after freeze-thaw. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123(4): 305-313.
- Kraus JF and Benson CH, 1995. Effect of freeze- thaw on the hydraulic conductivity of barrier materials: laboratory and field evaluation. *Research and development: EPA/600/SR-95/118*.
- Othman MA, 1992. Effect of freeze-thaw on the structure and hydraulic conductivity of compacted clay. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin Madison, Wisconsin, USA.
- Othman MA and Benson CH, 1993. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity of three compacted clays from Wisconsin. *Transportation Research Record* 1369: 118-125.
- Penner E, 1957. Soil moisture tension and ice segregation. *Highway Research Board, Bulletin* 168: 50-64.
- Podgorney RK and Bennett JE, 2006. Evaluating the long-term performance of geosynthetic clay liners exposed to freeze-thaw. *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(2): 265-268.
- Rowe RK Mukunoki T and Bathurst RJ, 2008. Hydraulic conductivity to jet-A1 of GCLs after up to 100 freeze-thaw cycles. *Geotechnique* 58(6): 503-511.
- Taylor GS and Luthin JN, 1978. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. *Canadian Geotechnical Journal* 15: 548-555.
- Williams PJ and Perfect E, 1980. Investigation of thermally actuated water migration in frozen soils. *Geotechnical Science Laboratories, Department of Geography, Carleton University, Ottawa, Canada*.
- Zimmie TF Laplante CM and Bronson DL, 1991. The effect of freezing and thawing on landfill covers and liners. Pp. 363-371. *Proceedings 3rd International Symposium on Cold Regions Heat Transfer*, University of Alaska, Fairbanks, USA.