

## Evaluation of the effect of freeze-thaw cycles on the compressibility of powdered shale-clay in the presence of lead and zinc heavy metals

Minoo Nikghalbpour<sup>1</sup>, Alireza Negahdar<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Candidate, Civil Engineering Department, Technical Faculty, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran  
2- Associate Professor, Civil Engineering Department, Technical Faculty, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

### ABSTRACT

With population growth, technological advancement, and the increase in heavy metal pollutants, besides the location of a quarter of the earth's surface in cold regions, it is necessary to study the effect of freeze-thaw cycles on clay and predict its behavior over time. The effect of freeze-thaw cycle on the behavior of clay contaminated with heavy metals has been less investigated. In addition, low plasticity clay and shale sedimentary rock are frequent in our country, Iran. As an innovation in this article, the effect of the b-thaw cycle on the compressibility behavior of shale-clay soil in the presence of lead and zinc heavy metal pollutants. In the present research, the combination of low plasticity clay with 40 and 60% crushed shale was investigated. For this purpose, a number of 60 one-dimensional and Etterberg limit tests were conducted on the samples in the presence of 0, 5 and 25 cmol/kgsoil of lead nitrate and zinc nitrate pollutants. According to the obtained results, the most changes in liquid limit are related to the samples contaminated with 25 cmol of lead nitrate after 12 cycles of freeze-thaw cycles with a 43% reduction. And the lowest changes in liquid limit are related to the combination of 40% kaolinite with 25 cmol of zinc nitrate pollutant. Also, the results obtained from the consolidation test indicate that the compressibility of the samples was affected by the concentration of lead and zinc heavy metal pollutants and the freeze-thaw cycle. The increase of heavy metal pollutants led to a decrease in the initial void ratio and compressibility index of the samples compared to freeze-thaw cycle, which led to an increase in these ratios. The maximum changes were made in the first four cycles of the freeze-thaw cycle, and the changes were insignificant until the 12th cycle.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 13 August 2022  
**Revise Date:** 24 November 2022  
**Accept Date:** 09 December 2022

### Keywords:

Clay cover  
Landfill  
Cold regions  
1-D Consolidation  
Heavy metal

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.354959.2894>

\*Corresponding author: Alireza Negahdar.  
Email address: negahdar@uma.ac.ir

## ارزیابی اثر چرخه انجماد و ذوب بر رفتار نشست‌پذیری شیل پودر شده - خاک رسی در برابر فلزات سنگین سرب و روی

مینو نیک قلب پور<sup>۱</sup>، علیرضا نگهدار<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

با افزایش جمعیت، پیشرفت تکنولوژی و به تبع آن افزایش آلاینده‌های فلزات سنگین و نیز قرار گرفتن یک چهارم سطح زمین در مناطق سردسیر، مطالعه‌ی تاثیر فرایند انجماد و ذوب روی خاک‌های رسی و پیش بینی رفتار آن‌ها با گذشت زمان ضروری می‌باشد. با توجه به این‌که اثر چرخه انجماد و ذوب بر رفتار خاک‌های رسی آلوده به فلز سنگین کمتر مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین گستردگی وجود خاک رسی با خمیری پایین و سنگ رسوبی شیل در کشور ایران به عنوان نوآوری، در مقاله حاضر هدف بررسی تاثیر چرخه انجماد و ذوب بر رفتار نشست‌پذیری ترکیب شیل پودر شده - خاک رسی در برابر آلاینده‌های فلزات سنگین سرب و روی می‌باشد. در پژوهش حاضر خاک رسی با خمیری پایین به همراه ۴۰ و ۶۰ درصد شیل خرد شده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور تعداد ۶۰ آزمایش تحکیم یک بعدی و حدود انتربرگ بر روی ترکیب شیل پودری-خاک رس در برابر ۰، ۵ و ۲۵ سانتی مول بر کیلوگرم خاک، از آلاینده‌های نیترات سرب و نیترات روی انجام گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، بیشترین تغییرات حد روانی مربوط به نمونه‌های آلوده به ۲۵ سانتی مول نیترات سرب پس از ۱۲ چرخه انجماد و ذوب با ۴۳ درصد کاهش می‌باشد. کمترین تغییرات حد روانی مربوط به ترکیب ۴۰ درصدی کائولینیت با ۲۵ سانتی مول آلاینده نیترات روی می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده از آزمایش تحکیم بیان‌گر این موضوع است که خصوصیات نشست‌پذیری نمونه‌ها تحت تاثیر غلظت آلاینده فلز سنگین سرب و روی و چرخه انجماد و ذوب قرار داشته است. افزایش آلاینده فلز سنگین منجر به کاهش نسبت تخلخل اولیه و شاخص فشردگی نمونه‌ها و چرخه انجماد و ذوب منجر به افزایش این نسبت‌ها گردیده است. همچنین حداکثر تغییرات در چهار چرخه اول انجماد و ذوب ایجاد شده در حالی‌که تا چرخه دوازدهم تغییرات ناچیز بوده است.

کلمات کلیدی: پوشش رسی، مدفن زباله، مناطق سردسیر، تحکیم یک بعدی، آلاینده فلز سنگین

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.354959.2894">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.354959.2894</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.354959.2894">10.22065/jsce.2022.354959.2894</a>	۱۴۰۲/۰۷/۳۱	۱۴۰۱/۰۹/۱۸	۱۴۰۱/۰۹/۱۸	۱۴۰۱/۰۹/۰۳	۱۴۰۱/۰۵/۲۲
علیرضا نگهدار negahdar@uma.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

خاک آلوده به فلزات سنگین یکی از جدی‌ترین مشکلات ژئوتکنیکی و زیست محیطی در جهان است. به دنبال رشد سریع صنعت در طی چند دهه گذشته، آلودگی خاک به فلزات سنگین ناشی از عواملی مانند ریزش‌های جوی، استفاده از کود، لجن فاضلاب و آفت‌کش‌ها در کشاورزی، ضایعات حاصل از صنایع و مدفن‌های زباله افزایش یافته است [۱]. آلاینده‌های فلز سنگین می‌توانند سبب به خطر انداختن سلامت محیط زیست و انسان شوند.

خاک‌های رسی به دلیل سطح مخصوص زیاد با مواد موجود در آلاینده‌ها واکنش داده و این واکنش منجر به تغییر خصوصیات فیزیکی و مهندسی آن‌ها می‌گردد [۲، ۳]. توانایی خاک‌های رسی در جذب آلاینده‌ها باعث می‌شود که به عنوان لایه‌ای جاذب در مناطق دفن زباله به منظور جلوگیری و یا کاهش انتقال شیرابه به آب‌های زیر زمینی مورد استفاده قرار گیرند [۴-۶]. از طرفی با توجه به این که خاک‌های رسی بخش قابل توجهی از سطح زمین را پوشانده‌اند [۷، ۸]، همیشه در معرض قرار گیری در برابر فلزات سنگین هستند. بر این اساس بررسی نحوه تغییر خصوصیات خاک‌های رسی با در نظر گرفتن نوع آلاینده، مقدار آلاینده و نوع خاک رسی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

فلزاتی که عمدتاً در سایت‌های آلوده یافت می‌شوند و توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA, 1996) معرفی شده‌اند عبارتند از: سرب، کروم، آرسنیک، روی، مس و جیوه. بین فلزات سنگین، سرب به عنوان یکی از خطرناک‌ترین و شایع‌ترین آلاینده‌های محیط زیست شناخته شده است. فلزات سنگین عموماً بسیار سمی می‌باشند که می‌تواند بیماری‌هایی نظیر بیماری‌های کلیوی، نقص در اسکلت بدن، مشکلات ریوی مزمن، سرطان، افزایش فشار خون و غیره را در انسان به همراه داشته باشند [۹].

گروه‌های اصلی خاک‌های رسی مانند گروه اسمکتیت<sup>۱</sup> و کائولین<sup>۲</sup> می‌توانند به دلیل خاصیت جذب آلاینده به عنوان مصالح تشکیل دهنده آستر مدفن زباله مورد استفاده قرار گیرند. خاک‌های گروه اسمکتیت در مقایسه با کائولینیت به دلیل داشتن خاصیت جذب بالای آلاینده در عین حال نفوذپذیری کمتر به عنوان آستر مدفن از محبوبیت بیشتری برخوردار هستند [۱۰، ۱۱]. در مقابل، اسمکتیت دارای پتانسیل تورم و انقباض بسیار بیشتری نسبت به سایر انواع رس‌هاست و این خصوصیت منجر به تغییرات حجمی قابل ملاحظه این خاک در برابر تغییرات رطوبتی می‌شود که می‌تواند پیامدهای نامطلوبی را به همراه داشته باشد [۴]. همچنین رس‌های خانواده کائولینیت به دلیل خاصیت تورمی پایین باعث کاهش پتانسیل تورم و انقباض بنتونیت هنگام مخلوط شدن با این خاک می‌گردد [۱۲]. البته کائولینیت از انواع رس‌های با خمیری پایین به علت داشتن بار منفی کم در سطح ذرات، قابلیت پایداری در جذب و نگهداری آلاینده دارد. در حالی که حضور کربنات‌ها در این خاک سبب افزایش قابلیت نگهداشت آلاینده می‌گردد [۱۳، ۱۴].

کمبود منابع رسی خالص، مشکلات عملکرد پوشش‌های رسی متراکم شده در مراکز دفن بهداشتی زباله در اثر تغییر رطوبت، تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی در اثر چرخه‌های مکرر انجماد و ذوب موجب شده که محققین ترکیبات مختلفی در ترکیب با خاک‌های رسی را مورد آزمایش قرار دهند [۱۵-۱۸]. در این میان نفوذپذیری بسیار پایین سنگ‌های رسوبی ریز دانه مانند شیل<sup>۳</sup> یا لای سنگ<sup>۴</sup> موجب استفاده از این ماده به عنوان پوشش جذب کننده و نگهدارنده آلاینده شده است [۱۹].

شیل‌ها فراوان‌ترین سنگ رسوبی هستند و در حوضچه‌های رسوبی سراسر جهان وجود دارند. این سنگ عمدتاً ترکیبی از کانی‌های رسی و ذرات کوارتز هستند و رس مهم‌ترین جزء سازنده آن‌ها است. ایران ذخایر فراوانی از این نوع ماده در استان‌های ایلام و کرمانشاه دارد. دیگر واحدهای ساختاری ایران که در آن شیل گسترش فراوان دارد عبارتند از منطقه البرز - آذربایجان و ایران مرکزی [۲۰]. تحقیقات نشان داده است که استفاده از مخلوط شیل و خاک رس به عنوان یک ماده جذب فلزات سنگین در پوشش کف مدفن‌های زباله موثر است [۱۵].

<sup>1</sup> Smectit

<sup>2</sup> Kaoline

<sup>3</sup> Shale

<sup>4</sup> Mudstone

خصوصیت ژئوتکنیکی رس‌ها تحت تاثیر عوامل مکانیکی و فیزیکی-شیمیایی مایع منفذی قرار دارد [۲۱]. عوامل مکانیکی عموماً متاثر از رفتار مقاومتی توده ذرات در اثر بارگذاری بوده در حالی که رفتار فیزیکی-شیمیایی مربوط به اندرکنش سطح تماس ذرات رسی تحت تاثیر لایه دوگانه پخشیده (DDL<sup>5</sup>) قرار دارد [۳، ۲۲]. نتایج حاصل از تحقیقات بیان گر آن است که حضور آلاینده فلز سنگین در سیال منفذی رس‌ها موجب تغییر در ضخامت لایه دوگانه پخشیده می‌گردد [۳]. نظریه لایه دوگانه در ابتدا توسط گوی<sup>۶</sup> و چپمن<sup>۷</sup> [۲۳] در سال ۱۹۱۳ ارائه، سپس توسط استرن<sup>۸</sup> [۲۴] در سال ۱۹۲۴ اصلاح شد و توسط محققین به منظور تحلیل رفتار فشردگی رس‌ها در حضور محلول‌های مختلف الکترولیتی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه تعدادی زیادی از محققین به بررسی چگونگی تغییر ضخامت لایه دوگانه و تاثیر آن در تغییر خصوصیات تحکیمی، رسوب و نفوذپذیری خاک‌های رسی در مجاورت آلاینده پرداختند [۱۷، ۲۵، ۲۶]. بر اساس تحقیق انجام شده توسط تروینو و کولس<sup>۹</sup> [۲۷] در سال ۲۰۰۳، ساختار خاک و pH کاتولینیت با جذب آلاینده فلز سنگین دچار تغییر شده که دلیل آن واکنش بین آنیون‌های لایه دوگانه با کاتیون‌های فلز سنگین است.

نگهدار و همکاران [۲۸، ۲۹] در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ به بررسی مقاومت برشی و خصوصیت نشست‌پذیری خاک رسی کاتولینیت در ترکیب با درصد‌های مختلف ماسه در برابر فلزات سنگین سرب و روی پرداختند. بر اساس نتایج این محققین با افزایش غلظت هر دو آلاینده، مقاومت برشی، میزان تخلخل اولیه و نشست‌پذیری نمونه‌ها کاهش یافته است. تفاوت نتایج بدست آمده در برابر آلاینده‌های سرب روی را به فرآیند جذب انتخابی و رسوب‌پذیری در اندرکنش خاک و آلودگی نسبت دادند.

طیف گسترده‌ای از پژوهش‌ها اثر آلاینده فلز سنگین بر خاک رسی در دمای آزمایشگاه مورد بررسی قرار داده‌اند [۲، ۱۳، ۱۸]. به دلیل گستردگی نواحی سردسیر در سرتاسر جهان، تغییر خصوصیت خاک در شرایط تغییر دمایی و عدم کارایی روش‌های متداول در تخمین خصوصیات خاک زمانی که در برابر چرخه‌های متعدد انجماد و ذوب قرار می‌گیرد، پیشرفت چشمگیری در زمینه مدیریت مهندسی خاک‌های یخ زده شده است [۳۰]. انجماد و ذوب می‌تواند تغییرات قابل توجهی در مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه ایجاد کند و منجر به تغییر حجم، مقاومت، تراکم، چگالی و ظرفیت باربری شود [۳۱]. ترک‌خوردگی و لایه‌لایه شدن خاک رایج‌ترین نتیجه‌ی آسیب ناشی از وقوع فرآیند انجماد و ذوب است که باعث افزایش نفوذپذیری و تسهیل انتقال شیرابه‌های سمی و خطرناک حاوی یون‌های فلزات سنگین به لایه‌های زیرین زمین و در نتیجه آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی شده و خطرات جدی را ایجاد نماید [۳۲]. عوامل و شاخص‌های متعددی در چگونگی رفتار خاک‌ها پس از چرخه‌های انجماد و ذوب موثر است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به دانه‌بندی خاک، خصوصیات خاک، ترکیبات معدنی ریزدانه‌ها، درصد رطوبت، درجه تراکم، هدایت هیدرولیکی، صعود ناشی از مویبندی، مقاومت برشی، گرادیان هیدرولیکی و خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی، شرایط دما (مدت و مقدار دمای انجماد، گرادیان دما)، شرایط آب و هوای محلی و تعداد دفعات چرخه‌های انجماد و ذوب و فشار لایه‌های سربار اشاره کرد [۳۳]. خصوصیات فیزیکی خاک مانند نفوذپذیری و تغییر حجم بین ۳ تا ۹ چرخه انجماد و ذوب تثبیت می‌شود [۳۴]. وجود برخی مواد معدنی مانند کلریدها، بر روی نقطه انجماد آب حفره‌ای و در نتیجه تشکیل لنز یخ در خاک تأثیر می‌گذارد، اما چون تأثیر آن به طور کلی بسیار کم است، اغلب نادیده گرفته می‌شود. تحقیقات انجام شده توسط چوردا<sup>۱۰</sup> [۳۵] در سال ۱۹۸۳، لیو<sup>۱۱</sup> و پنگ<sup>۱۲</sup> [۳۶] نشان داد که مقاومت فشاری با افزایش نمک به دلیل کاهش دمای انجماد آب و تشکیل لایه‌های آب منجمد نشده در اطراف دانه‌های خاک، کاهش می‌یابد. با این حال، در نظر گرفته می‌شود که این لایه‌ها تأثیر ناچیزی در توسعه مقاومت خاک تحت چرخه انجماد و ذوب دارند. انجماد و ذوب می‌تواند تغییراتی بسیار اندک و تقریباً قابل چشم‌پوشی در نفوذپذیری هیدرولیکی ایجاد کند و یا چندین برابر بیشتر از مقدار اولیه‌ی آن باشد [۳۷]. هنگامی که انجماد و ذوب منجر به افزایش نفوذپذیری هیدرولیکی خاک شود، ساختار خاک نیز می‌تواند متراکم شود. به دلیل این‌که متراکم شدن خاک معمولاً با کاهش نفوذپذیری همراه است این نتیجه در ابتدا نادرست به نظر می‌آید، اما تحقیقات و مطالعات زیادی که بر روی انواع خاک‌ها و در شرایط آزمایشگاهی

<sup>5</sup> Diffuse double layer

<sup>6</sup> Goy

<sup>7</sup> Chapman

<sup>8</sup> Stern

<sup>9</sup> Trevino-Coles

<sup>10</sup> Czurda

<sup>11</sup> Liu

<sup>12</sup> Peng

متفاوت انجام شده این موضوع را تأیید کرده است. سابقه انجماد و ذوب خاک رس فوق تحکیم یافته می‌تواند منجر به افزایش نسبت تخلخل شود، در حالی که رس عادی تحکیم یافته کاهش نسبت تخلخل را تجربه می‌کند. نسبت تخلخل را می‌توان با افزایش آب حفره‌ای و مقاومت کششی کمتر در یک خاک اشباع مرتبط دانست [۳۸]. مقاومت برشی در شرایط زهکشی نشده اغلب به عنوان پارامتر اولیه خاک در طراحی ژئوتکنیک استفاده می‌شود، زیرا منجر به خاک ضعیف‌تری نسبت به شرایط زهکشی خواهد شد. شرایط تنش تحمیل شده بر روی خاک، از جمله فشارهای محدود و بارهای سنگین، بر رفتار مقاومت خاک تأثیر بسزایی خواهد گذاشت [۳۹]. وقتی یک خاک در معرض چرخه انجماد و ذوب قرار می‌گیرد، به دلیل کاهش فضای منافذ نشست را تجربه می‌کند. پیش‌بینی می‌شود که بیشترین تغییر مقاومت برشی در ۳ تا ۱۰ چرخه اول اتفاق بیافتد و با کاهش فضای منافذ به حالت تعادل نزدیک شود. پس از تعداد زیادی چرخه انجماد و ذوب، مقاومت برشی رس‌ها کمی افزایش یافته است. تغییر نسبت تخلخل از تشکیل لیزهای یخی با تغییر در ساختار خاک به دلیل جابجایی ذرات خاک مرتبط شده است، که به نوبه خود پیوستگی ذرات را مختل کرده و چسبندگی را کاهش می‌دهد. این منجر به کاهش مقاومت خاک می‌شود [۴۰].

بر اساس مطالب گفته شده می‌توان نتیجه گرفت که بررسی تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی خاک‌های رسی در برابر فلزات سنگین از اهمیت به سزایی برخوردار است. به دلیل کمبود منابع رسی خالص، عملکرد مناسب شیل در جذب آلاینده که در ادبیات فنی به آن اشاره شد و با در نظر گرفتن این مساله که بررسی اثر همزمان چرخه انجماد و ذوب بر روی ترکیب خاک کائولینیت-شیل در برابر فلز سنگین سرب و روی کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است در پژوهش حاضر خصوصیات نشست‌پذیری سنگ شیل خرد شده انتخاب گردید تا اثر ترکیب آن با خاک رسی با در نظر گرفتن چرخه انجماد و ذوب و همزمان وجود آلاینده فلز سنگین مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور اثر ترکیب خاک درصدهای وزنی ۱۰۰، ۶۰ و ۴۰ درصد از ترکیب خاک رسی با شیل خرد شده انتخاب گردید. آزمایش‌های تحکیم یک بعدی، حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های بدون آلاینده، ۵ و ۲۵ سانتی مول بر کیلو گرم خاک در چهار حالت ۰، ۸، ۴ و ۱۶ چرخه انجماد و ذوب انجام گرفت.

## ۲- روش تحقیق

خاک رسی مورد استفاده در پژوهش حاضر، از شرکت صنایع خاک چینی ایران تهیه گردیده است و به نام کائولینیت سوپر زنوز شناخته می‌شود. شیل مورد استفاده نیز از شرکت آجر ماشینی کیان بهساز تهیه شده است. کائولینیت و شیل، سنگ رسوبی، به صورت پودر شده و عبوری از الک شماره ۴۰ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آزمایش‌های حدود اتربرگ و چگالی نسبی دانه‌ها بر اساس استانداردهای ASTM D4318-17e1 [۴۱] و ASTM D854-14 [۴۲] بر روی این خاک‌ها انجام گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش حدود اتربرگ، این خاک‌ها در رده CL از سیستم متحد قرار گرفته‌اند. مشخصات ژئوتکنیکی خاک رسی و شیل مصرفی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: خصوصیات اولیه فیزیکی و شیمیایی خاک رسی و شیل

مشخصه مورد ارزیابی	مقدار اندازه‌گیری شده	
	شیل	خاک رسی
Liquid limit, LL, %	۳۹/۷	۴۹/۸
Plasticity Index, PI, %	۸/۹	۲۵/۵
Soil Classification	CL	CL
Relative Density, $G_s$	۲/۶۹	۲/۶۵

برای دستیابی به آلودگی مورد نظر در این پژوهش از دو آلاینده فلز سنگین سرب و روی به صورت نترات با فرمول‌های شیمیایی  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  و  $Pb(NO_3)_2$  با نام تجاری Merck آلمان استفاده شده است. فلزات سنگین تهدید جدی برای سلامتی انسان به شمار رفته و از طریق تماس با پوست و استنشاق جذب می‌شوند [۱]، در نتیجه تجهیزات حفاظت شخصی از قبیل دستکش و ماسک به منظور پیشگیری از تماس مستقیم آلاینده با پوست و استنشاق آن در هنگام انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس راهنمای ایمنی

استفاده از مواد شیمیایی<sup>۱۳</sup> دستکش نیتریل<sup>۱۴</sup> یکبار مصرف به منظور پیشگیری از تماس مستقیم پوست با آلاینده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر که قابلیت انحلال در رطوبت روی سطح پوست را دارند و ماسک N95 (استاندارد NIOSH<sup>۱۵</sup>) جهت ایجاد مانع برای نفوذ ذرات آلاینده به مجاری تنفسی به کار گرفته شد [۴۳]. همچنین به منظور دفع پسماندهای آزمایشگاه ابتدا حجم ضایعات نمونه‌های آزمایشی از طریق قرار دادن نمونه‌های مرطوب در فضای آزاد و در معرض نور خورشید به حداقل مقدار رسانده شده، سپس ضایعات در کیسه‌های نایلونی قرار گرفته و به قسمت ضایعات شیمیایی فلزات سنگین آزمایشگاه منتقل شدند [۴۴].

به منظور تهیه مخلوط کائولینیت-شیل پودر شده، خاک‌ها پس از قرار گیری در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به صورت خشک به با نسبت وزنی مورد نظر با هم مخلوط شدند تا زمانی که ترکیب کاملاً همگن شود [۴۵]. محلول‌ها شامل نیترات سرب و نیترات روی با غلظت‌های ۵ و ۲۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک آماده شدند. در ادامه بر اساس دستورالعمل متداول بین محققین محلول آلاینده با غلظت مورد نظر آماده و با نسبت وزنی ۱۰ به ۱ با ترکیب خاک مورد نظر درون بطری‌های پلاستیکی ریخته شد [۲۳]. پس از این مرحله نمونه‌ها به مدت ۴ روز و روزی ۲ ساعت توسط دستگاه لرزاننده الکتریکی کاملاً باهم مخلوط شدند. پس از به تعادل رسیدن سوسپانسیون به منظور ساخت نمونه‌های آزمایش تحکیم با حفظ حالت اشباع با جهت‌یافتگی همگن [۲۳]، قالب‌های تو در تو که از جنس پلاستیک فشرده صنعتی است استفاده گردید. پس از ته‌نشین شدن خاک داخل سلول بارگذاری روی نمونه به تدریج انجام می‌شود، به نحوی که در هر مرحله مقدار بار دو برابر بار اعمال شده در مرحله قبل می‌گردد. مدت زمان اعمال هر بار تا زمان ثابت شدن نشست سر قالب و عدم مشاهده خروج آب از بالا و پایین نمونه ادامه می‌یابد. پیش تحکیمی نمونه‌ها تا سربار ۲۵ kPa ادامه یافت. نمونه‌های رسی موجود در چرخه‌های صفر، ۴، ۸ و ۱۲ چرخه، ابتدا در دمای ۱۷- درجه سانتی‌گراد تحت انجماد و در دمای ۲۵+ درجه سانتی‌گراد تحت ذوب هر کدام به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفته است. به منظور جلوگیری از خطای تغییر درصد رطوبت نمونه‌ها در حین اعمال چرخه انجماد و ذوب بر اساس پیشنهاد استاندارد ASTM D560-03 [۴۶] نمونه‌ها در یک محفظه بسته قرار گرفتند. پس از این مرحله نمونه را از داخل قالب مغزه گیری کرده و در دستگاه تحکیم قرار داده شدند. مغزه‌گیری به دقت انجام گردید تا اثر دست‌خوردگی کاهش یابد. در حین انجام آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM D2435-11 [۴۷] درون سلول تحکیمی با استفاده از سیال با غلظت مشابه نمونه پر و جهت جلوگیری از تبخیر، سطح سلول با پوشش پلاستیکی پوشانده شد. جهت اطمینان از نتایج بدست آمده در هر آزمایش، نمودارهای ارائه شده بر اساس میانگین نتایج بدست آمده از سه بار تکرار بدست آمده‌اند.

اندازه‌گیری حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های آلوده به فلز سنگین و طی نمودن چرخه انجماد و ذوب مورد نظر، مطابق استاندارد ASTM D4318-17e1 [۴۱] بر روی باقیمانده نمونه‌های آماده شده برای آزمایش تحکیم به روش تر به خشک انجام شده است.

به‌منظور تعیین میزان کاتیون‌های جذب‌شده، آنالیز مشخصات آب حفره‌ای مطابق روش ارائه شده در مرجع EPA، با استفاده از دستگاه ICP<sup>۱۶</sup> دانشگاه تبریز انجام گردید [۴۸]. به منظور آماده‌سازی نمونه برای این آزمایش ابتدا ۱۰ میلی‌لیتر محلول ساخته شده از آلاینده و آب مقطر با غلظت مشخص آماده گردید، سپس ۱ گرم از نمونه خاک مورد نظر پس از خشک شدن در تیوب ریخته شد، نمونه‌ها به مدت ۴ روز و هر بار به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً با هم مخلوط شدند. در مرحله بعد با قرار دادن نمونه‌ها در دستگاه سانتری فیوژ فاز جامد و مایع خاک از هم جدا شده و غلظت آلاینده در فاز مایع توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید. آماده‌سازی نمونه‌ها به منظور انجام آزمایش پراش پرتو ایکس مشابه نمونه‌های آزمایش جذب آماده شده که پس از این مرحله، مقداری از سوسپانسیون از قسمت‌های میانی محلول به وسیله پیپت پاستور برداشته، بر روی لام شیشه‌ای تمیز و خشک ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت با قرار گیری در معرض هوای محیط خشک گردیده است.

<sup>13</sup> Chemical Safety Data Sheet

<sup>14</sup> Nitrile

<sup>15</sup> National Institute for Occupational Safety and Health

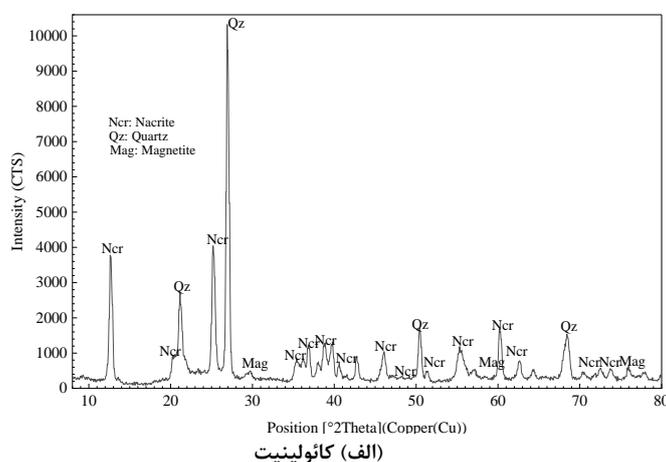
<sup>16</sup> Inductively Coupled Plasma

## ۳- نتایج و بحث

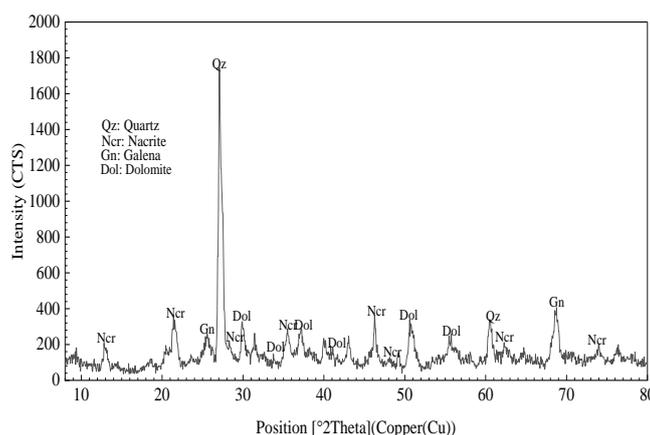
## ۳-۱- نتایج آزمایش XRD به منظور شناسایی ساختار کریستالی خاک رسی و شیل پودر شده

نتایج آزمایش الگوی پراش در نمونه‌های خاک رسی و شیل مصرفی در پژوهش حاضر به ترتیب در شکل ۱ (الف) و (ب) ارائه شده‌اند. بر اساس الگوهای بدست آمده در شناسایی ساختار کریستالی خاک رسی، بخش عمده تشکیل دهنده خاک رسی مورد آزمایش در این پژوهش حاوی کانی رسی ناکریت بوده است. ناکریت نوعی کانی رسی پلی مورف با کائولینیت بوده که در سیستم مونوکلینیک متبلور شده است [۴۹، ۵۰]. با توجه به اینکه کانی ناکریت، عضوی از گروه رس‌های کائولین و با فرمول شیمیایی مشابه کائولینیت بوده با ساختار کریستالی کمی متفاوت و با در نظر گرفتن اینکه در بسیاری از منابع فنی، کائولینیت به تمامی رس‌های این خانواده اطلاق می‌گردد [۱]، در پژوهش حاضر عنوان رس کائولینیت برای خاک رسی مورد استفاده به کار می‌رود.

نتایج کانی‌شناسی شیل مورد استفاده در این پژوهش که در شکل ۱ (ب) ارائه شده، نشان می‌دهد که ساختار کریستالی شیل پودر شده عمدتاً از کائولینیت و درصدی کربنات کلسیم و منیزیم تشکیل شده است.



(الف) کائولینیت

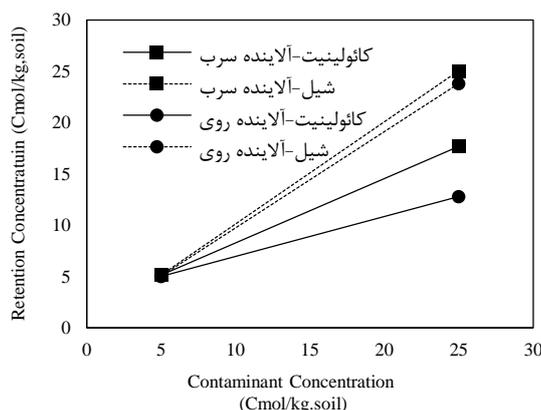


(ب) شیل

شکل ۱: نتایج آزمایش الگوی پراش X به منظور شناسایی ساختار کریستالی الف: کائولینیت ب: شیل پودر شده

## ۳-۲- نتایج آزمایش جذب اتمی کائولینیت و شیل پودر شده در برابر آلاینده‌های نیترات سرب و نیترات روی

به منظور بررسی میزان آلاینده‌های جذب شده توسط کائولینیت و شیل مورد استفاده در پژوهش حاضر، آنالیز مشخصات آب حفره‌ای با استفاده از آزمایش جذب اتمی بر روی نمونه‌های خاک در برابر غلظت‌های ۵ و ۲۵ سانتی‌مول فلز سنگین انجام گردید. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری تفاوت غلظت عناصر سرب و روی موجود در غلظت اولیه محلول و پس از جذب بخشی از آلاینده توسط نمونه‌های کائولینیت و شیل به عنوان میزان نگهداشت این کاتیون‌های فلزی توسط خاک در شکل ۲ ارائه گردید.



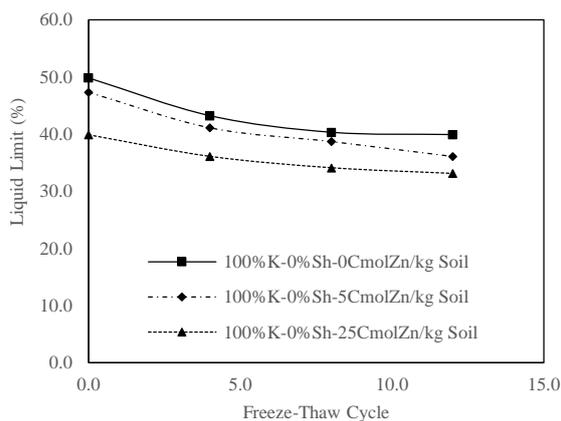
شکل ۲: نمودار میزان نگهداشت آلاینده فلز سنگین در کائولینیت و شیل

بر اساس نتایج آزمایش جذب، در غلظت ۵ سانتی مول هر دو فلز سرب و روی آلاینده‌ها به طور کامل توسط شیل و کائولینیت جذب شدند در حالی که در غلظت ۲۵ سانتی مول آلاینده نیترات سرب، کائولینیت فقط قادر به جذب ۱۵ سانتی مول از آلاینده را داشته است و خاک شیل تمام آلاینده را جذب نموده است. رفتار مشابه در آلاینده روی نیز مشاهده شده است. به نحوی که در غلظت ۲۵ سانتی مول آلاینده روی، ۱۳ سانتی مول آن توسط کائولینیت جذب شده و تمامی غلظت آلاینده توسط خاک شیل جذب شده است. غلظت آلاینده فلز سنگین جذب شده توسط کائولینیت منطبق بر نتایج بدست آمده نگهدار و همکاران می‌باشد [۲۹]. با اضافه شدن آلاینده در سیال منفذی، مولکول‌های آب موجود در سطح ذرات رسی با کاتیون‌های فلز سنگین جایگزین شده و این جایگزینی تا به تعادل رسیدن بار منفی سطحی ذرات رسی ادامه دارد. تفاوت شعاع اتمی مولکول‌های جایگزین شده با اتم‌های هیدروژن آب ( $H^+$ ) منجر به شکل‌گیری تنش در سطح ذرات رسی، تغییر نیروهای واندروالسی افزایش نفوذپذیری آن می‌گردد [۲۷].

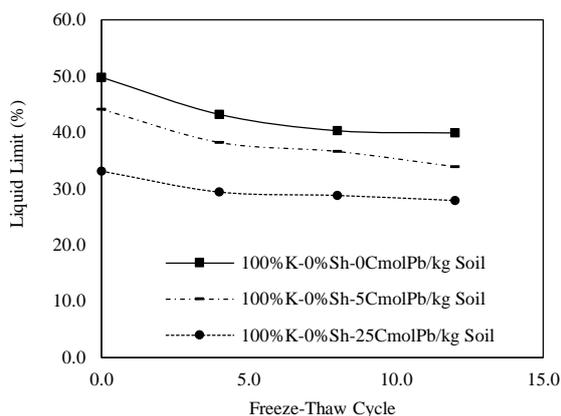
## ۳-۳- تأثیر چرخه انجماد و ذوب بر ترکیب شیل-کائولینیت در حضور آلاینده‌های فلز سنگین

خصوصیت خمیری رس‌ها یکی از خصوصیات بارز آن‌ها بوده که نشان‌گر توانایی شکل‌پذیری بی‌بازگشت بوده و بدون جدا شدن ذرات و گسیختگی رخ می‌دهد. باردار بودن سطح پولک‌های رسی از عوامل اصلی رفتار خمیری خاک شناخته شده است. با توجه به این‌که بار سطحی پولک‌های رسی تحت تأثیر خصوصیات مایع منفذی دچار تغییر شده، خصوصیت‌های روانی و خمیری خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرند. لذا در پژوهش حاضر به منظور بررسی اندرکنش آلاینده‌های نیترات روی و نیترات سرب بر روی ترکیب خاک‌های مورد بررسی در چرخه‌های انجماد و ذوب، حد روانی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کاساگرانده اندازه‌گیری گردید. شکل ۳ تغییرات حد روانی نمونه‌های مخلوط شیل-کائولینیت با و بدون آلاینده‌های فلز سنگین سرب و روی در غلظت‌های مورد نظر و چرخه‌های انجماد و ذوب نشان می‌دهد.

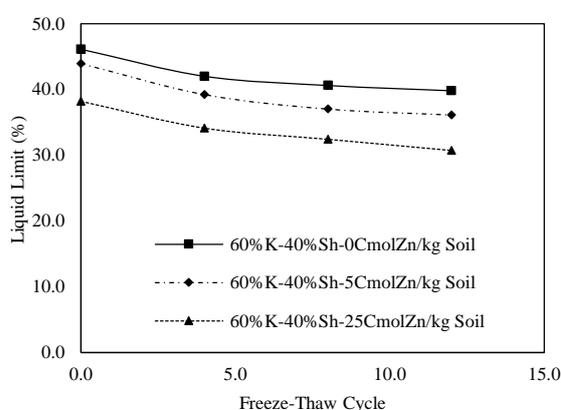




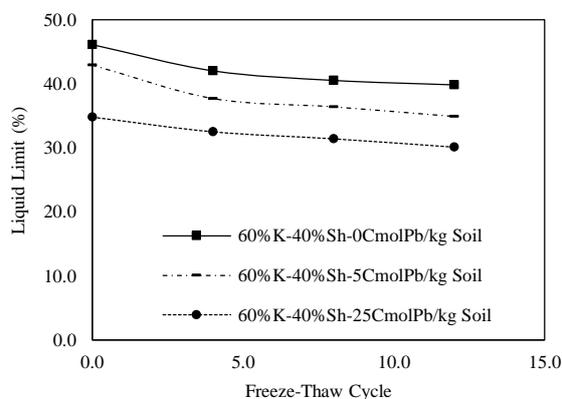
(ب)



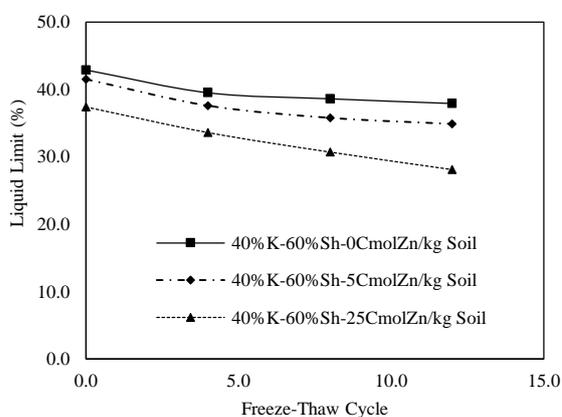
(الف)



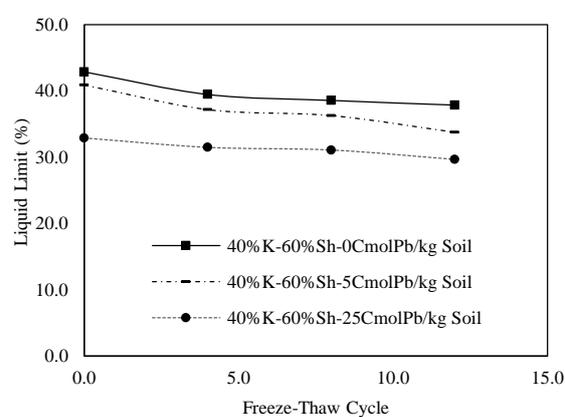
(د)



(ج)



(ه)



(و)

شکل ۳: تغییرات حد روانی در نمونه‌های شیل-کائولینیت در برابر چرخه انجماد و ذوب بدون آلاینده، ۵ و ۲۵ سانتی‌مول سرب و روی

بر اساس نتایج بدست آمده، در حضور ۵ سانتی مول برکیلوگرم خاک آلاینده فلز سنگین نیترات روی در نمونه‌ها به ترتیب با ۴۰ درصد و ۶۰ درصد شیل خرد شده به ترتیب ۰/۵، ۰/۴۷ و ۰/۳۲ کاهش در شرایط بدون چرخه انجماد و ذوب ایجاد شد. پس از ۱۲ چرخه روند کاهشی حد روانی ادامه داشته و برای نمونه‌های مشابه با همان غلظت آلاینده به ترتیب ۰/۱۰، ۰/۹ و ۰/۷ کاهش یافته است. روندی مشابه برای آلاینده سرب با غلظت یکسان مشاهده گردید به نحوی که در نمونه‌های بدون اثر چرخه انجماد و ذوب کاهشی برابر ۰/۱۱، ۰/۷ و ۵ درصد و پس از طی ۱۲ چرخه انجماد و ذوب به ترتیب کاهش‌ها برابر با ۰/۱۵، ۰/۱۲ و ۱۱٪ مشاهده گردید. تغییرات حد روانی

در غلظت ۵ سانتی مول تفاوت کمی داشته است و با افزایش غلظت آلاینده تغییرات حد روانی در ازای آلاینده فلز سرب بیشتر می‌باشد. کاهش حد روانی نمونه‌ها در حضور آلاینده‌های مورد استفاده و چرخه انجماد و ذوب طی شده بر اساس فرایندهای زیر توجیه می‌گردد:

در اثر واکنش فلزات سنگین با بار منفی موجود در ذرات رسی و متعاقب آن آزاد شدن یون‌های  $H^+$ ، pH محیط به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱]. با کاهش pH ضخامت لایه دوگانه پولک‌های رسی کاهش یافته و ساختار پراکنده به ساختار درهم تبدیل می‌شود. در اثر این تغییرات به دلیل کاهش سطح تماس پولک‌های رسی با آب، جذب آب ذرات کاهش یافته است و متعاقب آن حد روانی نمونه‌ها کاهش یافته است. ضخامت لایه دوگانه در اطراف پولک رسی بر اساس تئوری لایه دوگانه گوی-چپمن<sup>۱۷</sup> در معادله ۱ ارائه شده است. بر مبنای این تئوری برای یک ذره رسی ضخامت لایه دوگانه عمدتاً به ظرفیت و غلظت الکترولیت وابسته می‌باشد. هر تغییری در ضخامت این لایه بیان‌گر تغییر فاصله بین سطوح رسی، تغییر میزان اندرکنش بین ذرات و در نهایت تغییر در رفتار مهندسی خاک است [۱].

$$\frac{1}{K} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 D k T}{2 z_i^2 \epsilon^2 n_i}} \quad (1)$$

که  $1/K$  ضخامت لایه دوگانه بر حسب متر،  $\epsilon_0$  ثابت دی‌الکتریک خلاء،  $D$  ثابت دی‌الکتریک سیال،  $k$  ثابت بولتزمن (  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  )،  $T$  دمای محیط محلول بر حسب درجه کلونین،  $z_i$  ظرفیت یون،  $\epsilon_0$  بار الکتریکی،  $n_i$  غلظت اولیه یون در محلول (  $\text{ion} / \text{m}^3$  ) می‌باشند [۱۵].

در فرایند انجماد و ذوب ضخامت لایه دوگانه کاهش یافته و کاتیون‌ها در این لایه باز توزیع می‌شوند. بر اساس تئوری لایه دوگانه گوی-چپمن و معادله شماره ۱، با کاهش ضخامت لایه دوگانه پولک‌های رسی در اثر هر عاملی که در این پژوهش ناشی از حضور فلز سنگین و چرخه انجماد و ذوب می‌باشد، تجمع مولکول‌های آب و یون‌ها در نزدیکی پولک‌های رسی کاهش می‌یابد. در هنگام انجماد آب در اطراف پولک‌های رسی منجمد شده و با اعمال فشار منفذی منفی، یخ‌ها توسعه می‌یابند، از طرفی به دلیل جایگزینی کاتیون‌های فلز سنگین در اطراف پولک رسی، نیروی دافعه در این قسمت‌ها کاسته می‌شود. در اثر کاهش نیروی دافعه، پولک‌ها به هم نزدیک شده و ساختار مجتمع را تشکیل می‌دهند [۵۲]. کاهش ضخامت لایه دوگانه به دلیل بازتوزیع آرایش پولک‌های رسی در اثر اعمال چرخه انجماد و ذوب توسط یانگ<sup>۱۸</sup> [۵۳] در سال ۱۹۸۴ و ژانگ<sup>۱۹</sup> [۵۴] در سال ۲۰۱۹ گزارش شده است. هر چند که این تغییرات به شدت تغییر ضخامت لایه دوگانه در اثر قرار گیری در برابر فلزات سنگین نمی‌باشد در نتیجه تغییر درصد رطوبت حد روانی در اثر اعمال چرخه انجماد و ذوب برای نمونه‌های یکسان از نظر نوع خاک و درصد آلاینده، حداکثر ۶٪ بدست آمده است.

با مقایسه اثر دو آلاینده بر حد روانی نمونه‌ها می‌توان دریافت که کاهش حد روانی در نمونه سرب بیشتر از روی بوده و دلیل این امر را محققین به تمایل بیشتر کاتولینیت در جذب یون‌های با شعاع هیدراته بزرگتر در والانس یکسان نسبت دادند [۲۳]. در حالی که بر اساس تئوری لایه دوگانه گوی-چپمن در کاتیون‌های هم ظرفیت مانند  $\text{Pb (II)}$  و  $\text{Zn (II)}$  ضخامت‌های یکسانی از پولک رسی و لایه آب محصور در نتیجه حد روانی یکسانی وجود داشته باشد. محققین دریافتند که سرب به دلیل شعاع هیدراته کوچکتر نسبت به روی، چگالی بار واحد حجم بزرگتری داشته در نتیجه آب هیدراته را با قدرت بیشتری جذب نموده و ضخامت لایه دوگانه و نیروی دافعه بین ذرات کاهش بیشتری می‌یابد. با کاهش نیروی جاذبه بین ذرات، جذب آب و حد روانی کاهش یافته است [۵۵]. نتایج آزمایش جذب اتمی بر روی نمونه‌ها همچنین دلیل تائیدی بر خاصیت جذب انتخابی کاتولینیت از فلز سنگین سرب نسبت به روی می‌باشد. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش درصد شیل حد روانی با درصد کمتری کاهش می‌یابد، که این موضوع بیان‌گر اثر شیل در جذب آلاینده می‌باشد. به نحوی که افزایش ۶۰ درصد شیل و ۲۵ سانتی مول آلاینده سرب و پس از طی ۱۲ چرخه کاهش حد روانی ۲۲ درصد بوده است در حالی

<sup>17</sup> Goy- Chapman

<sup>18</sup> Yong

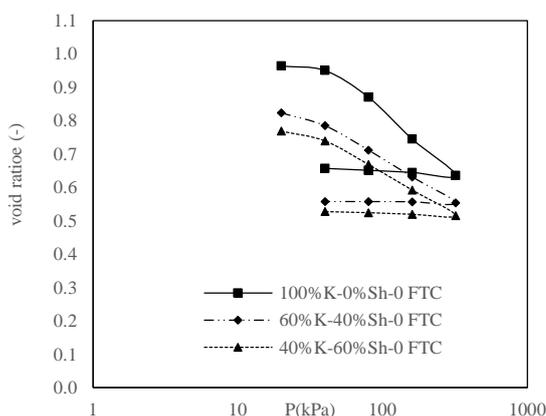
<sup>19</sup> Zhang

که در مقدار ثابت آلاینده و چرخه انجماد و ذوب این تغییر برای کائولینیت خالص برابر با ۳۰ درصد بوده است. در نتیجه با افزایش درصد شیل، خاک تغییرات کمتری را در برابر آلاینده‌های و چرخه انجماد و ذوب از خود نشان می‌دهد.

همچنین کمترین تغییرات مربوط به حد روانی در اثر تغییر چرخه‌های انجماد و ذوب در نمونه‌های با نسبت یکسانی از ترکیب خاک رسی و شیل، مربوط به نمونه‌های آلوده به ۲۵ سانتی مول سرب بوده است. که دلیل آن را می‌توان کمتر بودن نیروی دافعه بین پولک‌های رسی در اثر جایگزینی کاتیون‌های فلزی دانست در نتیجه ضخامت لایه آب در اطراف پولک‌های رسی کمتر بوده که میزان تاثیر پذیری این پولک در اثر عوامل محیطی انجماد را کاهش داده است.

### ۳-۴- اندازه گیری خصوصیات نشست پذیری نمونه‌های شیل-کائولینیت در برابر آلاینده فلز سنگین

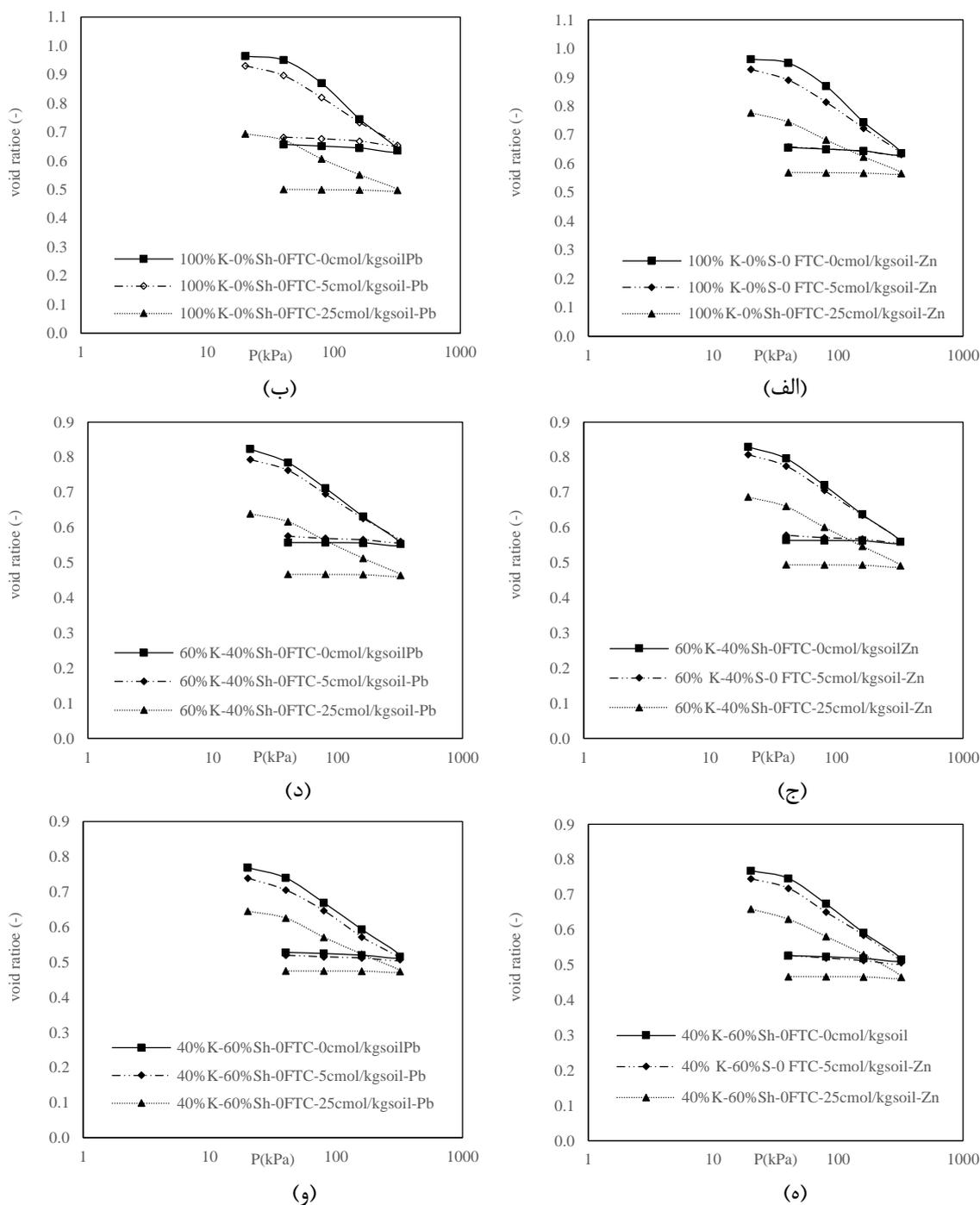
به منظور بررسی رفتار نشست پذیری نمونه‌ها آزمایش تحکیم یک بعدی انجام پذیرفت. آزمایش‌های تحکیم بر روی نمونه‌ها در تنش‌های ۲۰، ۴۰، ۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ کیلو پاسکال انجام شده‌اند. با توجه به یکسان بودن شرایط پیش بارگذاری نمونه‌ها تغییر مقدار نسبت تخلخل اولیه در نمونه‌های بدون آلاینده ناشی از تغییر تراکم پذیری درصدهای مختلف کائولینیت و شیل می‌باشد. مقایسه تغییر تراکم پذیری نمونه‌های بدون آلاینده در شکل ۴ ارائه گردیده است.



شکل ۴: منحنی تراکم درصدهای مختلف کائولینیت- شیل بدون حضور آلاینده

نتایج بدست آمده از آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های بدون آلاینده که در شکل ۴ ارائه گردیده، بیان‌گر کاهش نسبت تخلخل اولیه و نشست پذیری نمونه‌ها با افزایش درصد خاک شیل است. با توجه به ماهیت رسی شیل خرد شده و شاخص خمیری پایین‌تر، کاهش نشست‌پذیری نمونه‌ها در اثر افزایش درصد این خاک قابل انتظار می‌باشد. به نحوی که با افزایش ۴۰ و ۶۰ درصد شیل، ضریب فشردگی نمونه‌ها ( $C_c$ )، به ترتیب ۱۸٪ و ۲۳٪ نسبت به نمونه کائولینیت خالص کاهش یافتند.

نتایج آزمایش تحکیم بر روی درصدهای مختلف کائولینیت-شیل در معرض آلاینده‌های فلز سنگین در شکل ۵ ارائه گردیده است. بر اساس نتایج بدست آمده آلاینده فلز سنگین سرب در نمونه کائولینیت خالص شاخص فشردگی را ۴۰ درصد کاهش داده است، در حالی که با افزایش ۶۰ درصد شیل اثر آلاینده فلز سرب در کاهش شاخص فشردگی به ۳۲ درصد تغییر یافته است و دلیل این امر را می‌توان جذب بخش زیادی از آلاینده توسط خاک شیل دانست که در نتیجه آن تاثیر آلاینده فلز سنگین بر ترکیب خاک کاهش یافته است. این تغییرات برای آلاینده روی به ترتیب ۳۵ و ۲۳ درصد بوده است. به بیانی دیگر آلاینده روی اثر کمتری بر کاهش شاخص فشردگی نسبت به سرب دارد که عامل اصلی آن به جذب بیشتر سرب توسط خاک می‌باشد. مقایسه تغییر شاخص فشردگی نمونه‌ها در برابر آلاینده‌های سرب و روی نیز نشان‌دهنده تغییرات بیشتر شاخص فشردگی و نسبت تخلخل اولیه در برابر آلاینده سرب بوده به نحوی که در کائولینیت خالص افزایش ۵ سانتی مول بر گیلوگرم سرب منجر به کاهش ۱۵ درصدی شاخص فشردگی شده و به طور مشابه کاهش ۹ درصدی در برابر آلاینده روی شده است.



شکل ۵: منحنی تراکم درصدهای مختلف کائولینیت- شیل در حضور آلاینده نیترات سرب  $Pb(NO_3)_2$  و نیترات روی  $Zn(NO_3)_2$

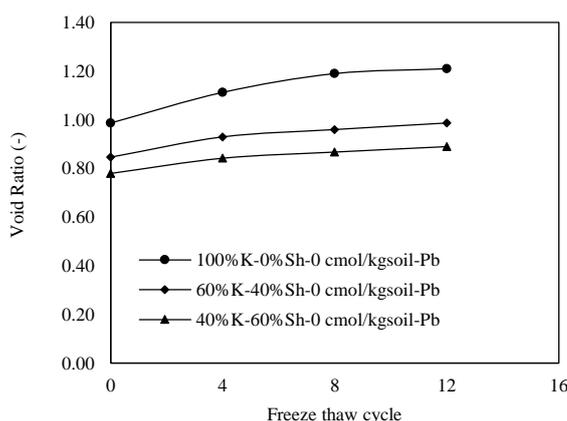
همچنین حضور آلاینده فلز سنگین در سیال منفذی به دلیل شکل گیری واکنش هیدرولیز، pH کاهش یافته و متعاقب آن در اثر کاهش ضخامت لایه دوگانه پولک‌های رسی ساختار درهم در خاک ایجاد می‌گردد. در اثر ایجاد ساختار درهم تراکم پذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه در ازای اعمال تنش پیش تحکیمی یکسان، نسبت تخلخل اولیه در نمونه‌های حاوی درصد بالای آلاینده فلز سنگین کمتر بوده است. در حالی که با افزایش آلاینده فلز سنگین در اثر کاهش مقدار سیال جذب شده توسط کانی‌ها، نشست پذیری نمونه کاهش یافته است. می‌توان ملاحظه نمود که شیب نمودار در نمونه‌های آلوده کمتر از نمونه‌های بدون آلاینده می‌باشد. بر اساس نتایج تحکیم بدست آمده که در شکل بیان شده می‌توان دریافت که با افزایش بارگذاری، تاثیر خصوصیات سیال منفذی بر رفتار نشست پذیری نیز کاهش

می‌یابد. به بیانی دیگر در صورت اعمال بارگذاری زیاد خصوصیات مکانیکی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در مقابل اثر خصوصیات سیال منفذی بر عملکرد خاک دارند [۲۳، ۲۹]. مقایسه نتایج بدست آمده از تراکم پذیری آلاینده‌های فلز سنگین سرب و روی در غلظت‌های یکسان بیان‌گر تاثیر گذاری بیشتر آلاینده فلز سنگین سرب بوده است. این نتایج نشان دهنده این امر است که تمایل نمونه‌های ساخته شده به جذب سرب بیشتر بوده لذا بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته اند. تفسیر این پدیده توسط محققین با مفهوم جذب انتخابی ارتباط داده شده است [۵۶].

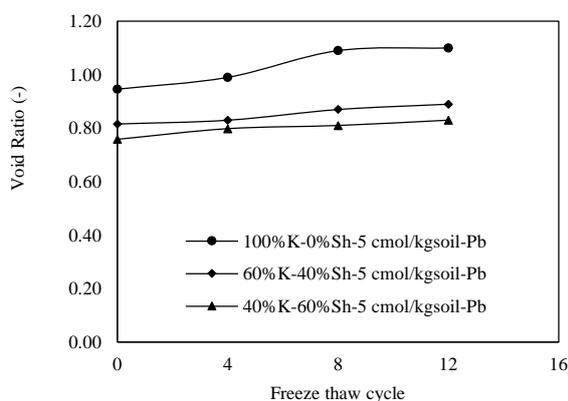
لازم به ذکر است مشاهده گردیده که با افزایش درصد شیل خرد شده، اثر آلاینده در تغییر خصوصیات نشست‌پذیری خاک کاهش یافته است. با توجه به نتایج آزمایش جذب اتمی، شیل خرد شده جذب آلاینده بالاتری را نسبت به کائولینیت داشته و با جذب آلاینده بیشتر اثر کاهش آلاینده بر خصوصیات نشست‌پذیری کاهش یافته است. از آنجایی که شیل به کار رفته در این پژوهش حاوی کانی رسی مشابه با کائولینیت بوده، جذب بالاتر شیل خرد شده به درصد کربنات کلسیم موجود در ساختار کریستالی آن نسبت داده می‌شود [۱۳].

### ۳-۵- اندازه گیری خصوصیات نشست‌پذیری نمونه‌های آلوده به فلز سنگین در برابر چرخه‌های انجماد و ذوب

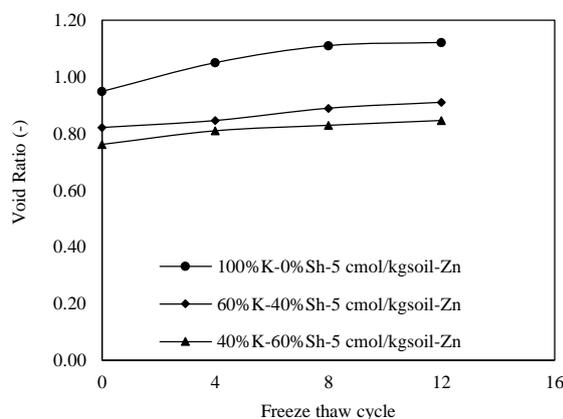
به منظور بررسی اثر چرخه انجماد و ذوب بر خصوصیات نشست‌پذیری پس از اعمال چرخه انجماد و ذوب مورد نظر بر روی نمونه تحکیم مغزه گیری شده، تحت آزمایش تحکیم یک بعدی قرار گرفتند. تغییرات نسبت تخلخل اولیه در ازای قرار گیری در شرایط چرخه‌های متوالی انجماد و ذوب در شکل ۶ ارائه شده است.



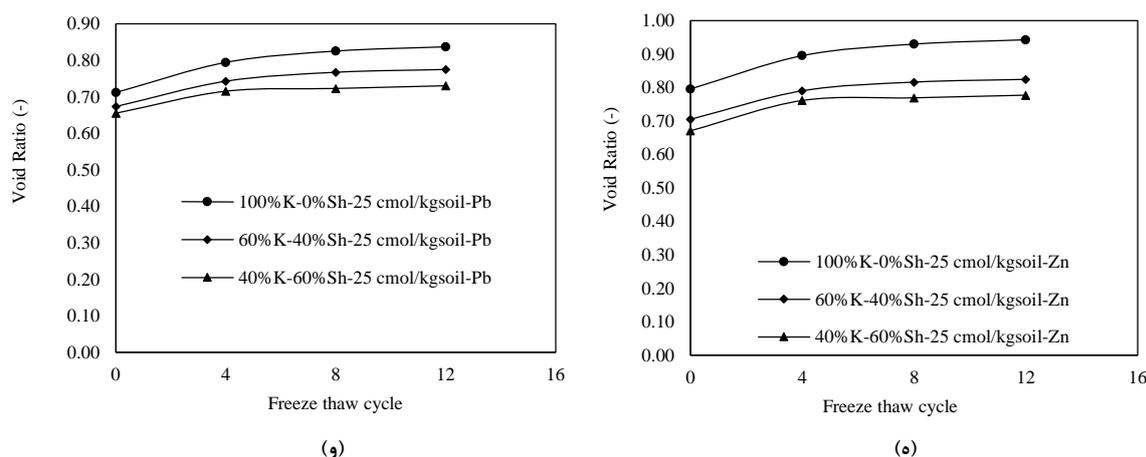
(الف)



(ج)



(ب)



شکل ۶: نمودار تغییر نسبت تخلخل اولیه با چرخه انجماد و ذوب

بر اساس نتایج بدست آمده افزایش آلاینده سرب از ۰ تا ۲۵ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ کائولینیت موجب کاهش ۲۷٪، ۲۱٪ و ۱۶٪ در نسبت تخلخل اولیه گردیده است. این کاهش در نمونه‌های با ترکیب خاک یکسان در برابر آلاینده روی کاهشی برابر با ۱۹٪، ۱۷٪ و ۱۴٪ را تجربه داشته‌اند. نسبت تخلخل اولیه در برابر آلاینده سرب با مقدار ۵ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در مقایسه با نمونه‌های بدون آلاینده کائولینیت-شیل بین ۲ تا ۴٪ کاهش یافتند. روندی مشابه در مورد آلاینده روی نیز ایجاد گردید. این بدان معناست که در غلظت‌های کم آلاینده، تاثیر نوع آلاینده دو ظرفیتی سرب و روی بر تغییر خصوصیت تراکمی ناچیز می‌باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌ها بدون آلاینده در برابر چرخه‌های مختلف انجماد و ذوب می‌توان ملاحظه نمود که پس از ۴ چرخه انجماد و ذوب نسبت تخلخل اولیه کائولینیت خالص ۱۲ درصد و نمونه حاوی ۴۰ درصد کائولینیت ۸ درصد افزایش یافته در نتیجه با افزایش درصد شیل، چرخه انجماد و ذوب اثر کمتری بر تراکم پذیری نمونه‌ها دارد. این نتیجه سازگار با داده‌های بدست آمده در آزمایش حدود روانی می‌باشد. کاهش حد روانی نشان‌دهنده کاهش تمایل پولک رسی در جذب آب بوده است. در اثر انجماد به دلیل تشکیل و توسعه لیز یخی و افزایش حجم آب پس از انجماد، حجم حفره‌ها افزایش می‌یابد. این ساختار پس از ذوب یخ در همان وضعیت باقی می‌ماند و در نتیجه خاک حفره‌ها بزرگتر شده و ساختار خاک ضعیف‌تر می‌گردد.

بر اساس منحنی‌های ارائه شده در شکل ۶ با افزایش چرخه انجماد و ذوب تا ۴ چرخه بیشترین تغییر نسبت تخلخل اولیه در تمامی نمونه‌ها رخ داده است و تا ۱۲ چرخه این تغییرات کمتر می‌گردد. یانگ<sup>۲۰</sup> و همکاران [۵۳] در سال ۱۹۸۴ با بررسی نتایج آزمایش‌های میکروسکوپ الکترونیکی<sup>۲۱</sup> بر روی نمونه‌های رسی یافتند که ساختار اولیه خاک در چرخه‌های اولیه انجماد و ذوب دچار تغییر اساسی می‌گردد. تغییر ساختار خاک پس از تعداد معینی چرخه ذوب و انجماد نسبتاً ثابت می‌گردد. ویکلندر<sup>۲۲</sup> [۵۷] در سال ۱۹۹۸ نشان داد که با شروع روند انجماد به دلیل شکل‌گیری و گسترش لیزهای یخی حجم حفرات افزایش یافته، پیوند بین پولک‌های رسی کاهش یافته و آرایش جدیدی از قرارگیری پولک‌های رسی ایجاد می‌شود. ساختار خاک پس از ذوب نسبتاً حفظ می‌گردد [۵۳]. نتایج آزمایش‌ها بیانگر افزایش حجم ۹ درصدی مایع منفذی در تغییر فاز سیال به جامد می‌باشد [۵۷]. یافته‌های کنراد<sup>۲۳</sup> [۵۸] در سال ۱۹۸۹ نشان می‌دهد که بیشترین تغییر نسبت تخلخل در نمونه‌ها در سه چرخه ابتدایی انجماد و ذوب ایجاد شده است؛ در نمونه‌های عادی تحکیم یافته به صورت کاهشی و در نمونه‌های پیش تحکیم یافته به صورت افزایشی بوده است.

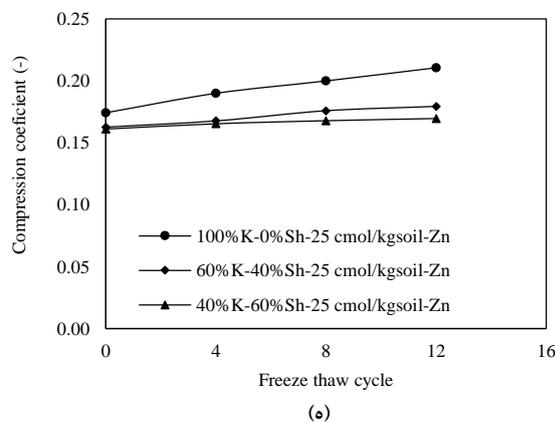
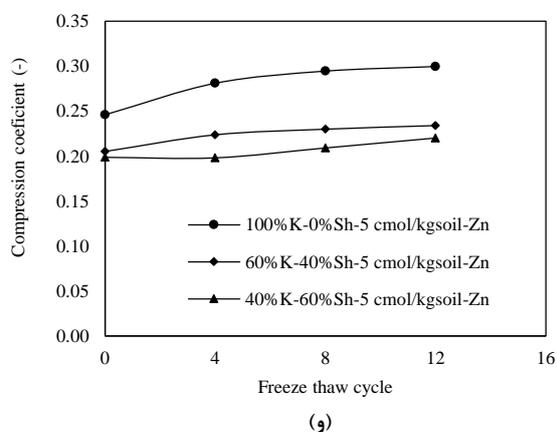
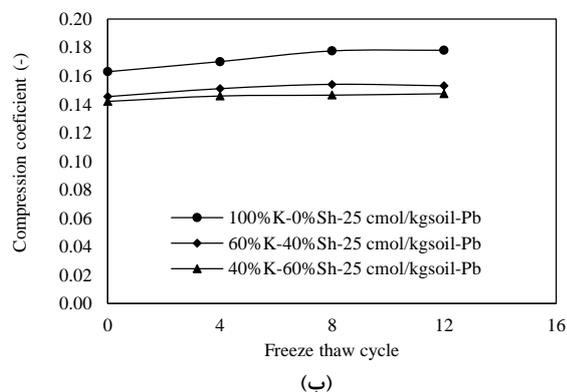
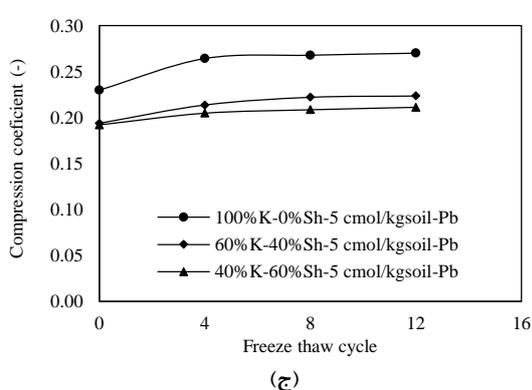
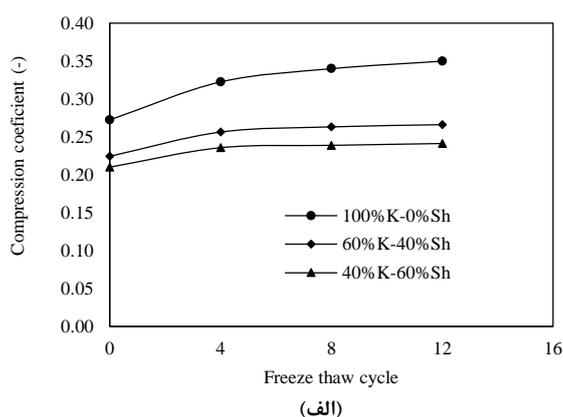
<sup>20</sup> Yong et al.

<sup>21</sup> Scanning Electron Micrograph

<sup>22</sup> Viklander

<sup>23</sup> Konrad

تغییرات شاخص فشردگی در نمونه‌ها در اثر چرخه‌های انجماد و ذوب در شکل ۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده افزایش چرخه انجماد و ذوب باعث افزایش خصوصیات فشردگی نمونه شده است. افزایش ضریب فشردگی پس از طی ۴ چرخه انجماد و ذوب قابل توجه بوده و از آن به بعد تقریباً ثابت شده است. پس از ۱۲ چرخه انجماد و ذوب، افزایش ۲۸ درصدی شاخص فشردگی در کائولینیت خالص ایجاد گردید. در حالی که در نمونه حاوی ۴۰ درصد کائولینیت تغییر شاخص فشردگی در ۱۲ چرخه فقط ۱۴ درصد می‌باشد. در هنگام انجماد، ترک‌های ریز بسیار زیادی در خاک شکل می‌گیرد. پس از ذوب یخ، خاک بلافاصله نمی‌تواند کل حجم سیال منفذی را جذب نماید در نتیجه آب تمایل به خروج از لایه خاک و شروع پدیده تحکیم دارد، این موضوع سبب می‌گردد خاک ناپایدار شده و تمایل به فشردگی افزایش یابد [۵۹]. در نمونه‌های با حد روانی بالاتر به دلیل تمایل بیشتر به جذب آب بیشتر بوده در نتیجه تاثیر پذیری در اثر چرخه انجماد و ذوب بیشتر خواهد بود.



شکل ۷: تغییرات ضریب فشردگی با چرخه‌های متناوب انجماد و ذوب

نتایج بدست آمده از نمودارهای ارائه شده در شکل ۷ بیانگر تغییرات بیشتر شاخص فشردگی در حضور آلاینده فلز سنگین روی می باشد. این نتیجه سازگار با نتیجه بدست آمده از اثرگذاری آلاینده‌های سرب و روی بر خصوصیات ریز ساختاری رس‌ها می باشد. با توجه به تمایل کمتر پولک‌های رسی در جذب آلاینده روی و لایه دوگانه بزرگتر، ضخامت لایه آب در اطراف پولک‌های رسی بزرگتر بوده است که این امر منجر به تاثیر پذیری بیشتر این پولک‌ها در برابر تغییرات فشار منفذی می شود. افزایش ضریب فشردگی در چرخه انجماد و ذوب می تواند در اثر شکل گیری فشار منفذی منفی باشد که در حفره‌های خاک پس از ذوب شکل می گیرد. در پژوهش‌های مشابه توسط وو<sup>۲۴</sup> و همکاران [۶۰] در سال ۲۰۲۱ نشست پذیری رس نرم به افزایش حجم حفره‌های موجود در خاک به دلیل تشکیل لوزه‌های یخی و شکل گیری تعداد زیادی ریزترک به دلیل افزایش حجم ناشی از تبدیل فاز مایع منفذی از حالت سیال به جامد ارتباط دادند. با توجه به تشکیل ساختار پایدار پس از ذوب این فرایند برگشت پذیر نبوده و منجر به افزایش تراکم پذیری می گردد. پیش از انجماد ساختار خاک به صورت مجتمع، اتصال ذرات به هم عمدتاً تماس گوشه به گوشه و حفره‌ها عمدتاً کوچک و بدون ارتباط با هم بودند. پس از طی چرخه‌های انجماد و ذوب دچار آرایش جدیدی شده، و به دلیل کاهش سطح ویژه پولک‌های رسی در راستای هم قرار می گیرند و به دلیل وجود ترک‌های ریز ارتباط بین حفره‌ها شکل می گیرد [۶۱]. این امر منجر به افزایش نفوذپذیری شده و انتظار می رود در اثر این پدیده شاخص فشردگی نیز کاهش یابد ولی نتایج آزمایش‌ها بیان کننده افزایش نشست پذیری با افزایش چرخه‌های انجماد و ذوب بوده که دلیل این امر را می توان به افزایش حجم حفرات و شکل گیری ترک‌های ریز در هنگام انجماد و به علاوه فشار منفذی منفی در اثر ذوب نسبت داد. در هنگام انجماد پیوند بین پولک‌های رسی ضعیف شده و پس از ذوب این ساختار بازیابی نشده و در اثر بارگذاری تغییر شکل‌های بیشتری را تجربه می نماید [۶۰].

در اغلب نمونه‌ها بیشترین تغییر خصوصیات فشردگی در چرخه انجماد و ذوب در ۴ چرخه اول ملاحظه شده و به دلیل تاثیر پذیری ساختار خاک، تغییر توزیع و اندازه حفرات در چرخه‌های اولیه و رسیدن به شرایط پایدار در چرخه‌های بیشتر می باشد که منطبق بر نتایج ارائه شده توسط سایر محققین می باشد [۶۲]. مقایسه مقدار تغییرات ایجاد شده در نشست پذیری نمونه‌های حاوی درصد‌های بالاتر شیل در ازای آلاینده و چرخه انجماد و ذوب یکسان ملاحظه گردید که این تغییرات در نمونه‌های حاوی ۶۰٪ شیل به حداقل خود رسیده است. این موضوع ناشی از جذب آب پایین شیل در مقابل کائولینیت بوده است.

#### ۴- نتیجه گیری

یافته‌های بدست آمده از پژوهش حاضر به شرح ذیل خلاصه می گردد:

(۱) فراوانی خاک‌های رسی در جهان از یک طرف و خصوصیت مطلوب این خاک‌ها به دلیل نفوذپذیری پایین و نگهداشت آلاینده از طرف دیگر، موجب گردیده این خاک به عنوان لایه نفوذناپذیر یا لایه جاذب آلاینده در مدفن‌های زباله به کار گرفته شود. با در نظر گرفتن وجود آلاینده فلز سنگین به عنوان ماده متداول در شیرابه زباله، مناطق صنعتی و پسماند کودها و سموم کشاورزی که تهدید جدی برای سلامتی انسان و محیط زیست به شمار می رود، بررسی تغییر خصوصیات خاک‌های رسی در مواجهه با آلاینده فلز سنگین بسیار حائز اهمیت است. در مقابل با توجه به گستردگی مناطق سردسیر که موجب می گردد خاک رسی به طور متناوب در معرض چرخه‌های انجماد و ذوب قرار گیرد مطالعه چگونگی تغییر خصوصیات مکانیکی و فشردگی خاک‌ها در شرایط ذکر شده مورد توجه محققین قرار دارد. به دلیل حساسیت بالای لوله‌های مدفون انتقال سوخت نفت و گاز و تاسیسات مدفون جمع‌آوری شیرابه و گاز در لایه‌های مدفن به نشست به خصوص نشست غیر یکنواخت، به علاوه لزوم پیش‌بینی تغییر شکل جداره شیب‌دار کانال یا روسازی مستقر در مناطق سردسیر تخمین میزان نشست پذیری و تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های در معرض همزمان آلاینده فلز سنگین و چرخه انجماد و ذوب اهمیت زیادی در طراحی دارد. در پژوهش حاضر تغییر شاخص فشردگی، نسبت تخلخل اولیه و حد روانی به منظور پیش‌بینی تغییرات آتی خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی خاک نسبت به چرخه‌های انجماد و ذوب مورد اندازه گیری قرار گرفتند. همچنین باید در نظر

<sup>24</sup> Wu et al.



داشت تعمیم نتایج آزمایشگاهی به شرایط واقعی باید با احتیاط زیادی صورت گیرد و می توان بیان نمود که نتایج آزمون های آزمایشگاهی به عنوان ابزار کمکی در کنار آزمایش های درجا، در پروژه های عملی مورد استفاده قرار گیرد.

(۲) نتایج بدست آمده از آزمایش های حدود اثر برگ انجام شده بر روی نمونه ها پس از قرار گیری در برابر درصدهای مختلف آلاینده فلز سنگین و چرخه های انجماد و ذوب نشان دهنده کاهش حد روانی می باشد. تغییرات درصد رطوبت حد روانی در برابر چرخه ذوب و یخ نسبتا ناچیز بوده در حالی که عامل آلاینده فلز سنگین تغییرات قابل توجهی در حد روانی ایجاد نموده است. این نتیجه را می توان به دلیل جذب یون های فلز سنگین توسط پولک های رسی، کاهش ضخامت لایه دوگانه و شکل گیری ساختار درهم دانست. خصوصیت خمیری خاک به طور مستقیم تحت تاثیر کاتیون های فلزی آلاینده های سرب و روی توسط پولک های کانی های رسی و آزاد شدن کاتیون های قلیایی از سطح پولک ها قرار دارد که منجر به تغییر pH مایع منفذی می گردد. در حالی که چرخه ذوب و انجماد با تغییر آرایش ذرات رسی تاثیر کمی بر تغییر رطوبت حد روانی داشته است. مقایسه تغییرات حد روانی در نمونه های با درصدهای مختلف شیل نشان داده که این تغییرات در نمونه های حاوی درصد بیشتر شیل کمتر بوده است. خاک شیل با جذب بیشتر آلاینده موجب شده تاثیر پذیری کاتولینیت در اثر تغییرات مایع منفذی کاهش یابد. نمونه های حاوی درصد شیل بیشتر، مقاومت بیشتری در برابر تغییر pH مایع منفذی ناشی از حضور آلاینده داشته است. با توجه به این که شیل خرد شده جذب آب کمتری نسبت به کاتولینیت دارد، در درصدهای بالاتر شیل تغییرات ناشی از چرخه انجماد و ذوب کاهش می یابد. این موضوع بیان گر عملکرد مناسب ترکیب شیل - کاتولینیت در مقابل کاتولینیت به تنهایی می باشد.

(۳) در نمونه های بدون آلاینده که به منظور بررسی اثر خاک شیل در ترکیب با کاتولینیت بر خصوصیات نشست پذیری صورت گرفته، می توان ملاحظه نمود که در شرایط عدم حضور آلاینده با اضافه کردن ۶۰ درصدی شیل خرد شده به کاتولینیت علاوه بر کاهش نسبت تخلخل اولیه، ضریب نشست پذیری هم تا ۲۳ درصد کاهش یافته است. این موضوع به دلیل ماهیت شیل پودر شده و شاخص خمیری پایین این ماده در نتیجه جذب آب کمتر آن می باشد.

(۴) با مقایسه نتایج آزمایش تحکیم بدون در نظر گرفتن چرخه انجماد و ذوب می توان دریافت که افزایش آلاینده سرب تا ۲۵ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در نمونه های حاوی ۱۰۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ کاتولینیت موجب کاهش ۲۷٪، ۲۰٪ و ۱۶٪ در نسبت تخلخل اولیه گردیده است. این کاهش در نمونه های با ترکیب خاک یکسان در برابر آلاینده روی برابر با ۱۹٪، ۱۷٪ و ۱۴٪ بوده است. به عبارت دیگر نتایج حاصل از آزمایش های صورت گرفته بر روی نمونه ها بیان گر کاهش نشست پذیری و نسبت تخلخل اولیه نمونه های خاک در ازای قرار گیری در معرض آلاینده فلز سنگین می باشد. این تغییرات کاهش در برابر آلاینده سرب بیشتر می باشد که دلیل آن با توجه به روند مشابه در پژوهش های سایر محققین به خاصیت جذب انتخابی خاک رسی نسبت به فلز سرب نسبت داد. در این شرایط علی رغم کاهش نسبت تخلخل اولیه به دلیل کاهش نیروی سطحی بین پولک های رسی، نفوذ پذیری خاک به شدت افزایش می یابد. این عامل می بایست در طراحی مدفن های زباله که هدف نگهداشت آلاینده و جلوگیری از نشست آن به لایه های زیرین می باشد مورد توجه قرار گیرد.

(۵) مقایسه درصدهای مختلف ترکیب نمونه ها در ازای درصد آلاینده یکسان بیان گر کاهش تاثیر آلاینده فلز سنگین بر خصوصیات نشست پذیری خاک با افزایش درصد شیل در نمونه ها می باشد. این موضوع را می توان به دلیل نقش پذیری شیل خرد شده در جذب آلاینده دانست. نتایج آزمایش جذب اتمی انجام نیز این نتایج را تایید می نماید. بر اساس نتایج آزمایش XRD در شناسایی ساختار کریستالی خاک ها، شیل به دلیل دارا بودن ترکیبات کلسیمی تمایل بالایی به جذب آلاینده فلز سنگین دارد. در نتیجه با افزایش درصد شیل اثر گذاری آلاینده فلز سنگین بر نمونه ها کاهش چشمگیری داشته است.

(۶) بر اساس نتایج بدست آمده در بررسی اثر چرخه انجماد و ذوب بر نسبت تخلخل اولیه خاک می توان دریافت که نسبت تخلخل اولیه نمونه ها پس از قرار گیری در برابر چرخه انجماد و ذوب تا ۴ چرخه روند افزایشی داشته و پس از آن تغییرات بسیار محدود بوده است. افزایش نسبت تخلخل اولیه به دلیل افزایش حجم حفرات در اثر افزایش حجم سیال در زمان انجماد، شکل گیری ترک های بسیار ریز ناشی از گسترش لنز های یخی و کاهش نیروی پیوند بین پولک های رسی می باشد. با توجه به این که پس از ذوب این که

تغییرات ایجاد شده در چرخه انجماد و ذوب برگشت ناپذیر می‌باشد. در نمونه‌های مورد آزمایش در پژوهش حاضر افزایش نسبت تخلخل مشاهده گردید.

(۷) اعمال چرخه انجماد و ذوب در نمونه‌ها نشان دهنده تغییر حداکثری خصوصیات نشست‌پذیری در اثر اعمال ۴ چرخه انجماد و ذوب می‌باشد. این تغییر در اثر اعمال ۸ و ۱۲ سیکل انجماد و ذوب تقریباً به صورت یکنواخت خواهد بود. می‌توان بیان داشت که بیشترین تغییرات مربوط به نشست‌پذیری ناشی از تغییر خصوصیات فیزیکی در پایان ذوب بیان شده است. مقایسه مقدار تغییرات ایجاد شده در نشست‌پذیری نمونه‌های حاوی درصد‌های بالاتر شیل کمتر بوده است به نحوی که ملاحظه شده تغییرات نشست‌پذیری در نمونه‌های حاوی ۶۰٪ شیل به حداقل خود رسیده است. این موضوع ناشی از جذب آب پایین شیل در مقابل کائولینیت بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که خاک شیل و کائولینیت ترکیب مناسبی را می‌توانند در مناطق سردسیر که در معرض آلاینده‌های فلز سنگین قرار بگیرند ایفا نمایند.

### مراجع

- [1] Yong, R.N. (2000). *Geoenvironmental engineering: Contaminated soils, pollutant fate, and mitigation*. 1<sup>st</sup> edition. Boca Raton: CRC press, 320.
- [2] Zhou, Q., Liu, Y., Li, T., Zhao, H., Alessi, D.S., Liu, W., Konhauser, K.O. (2020). Cadmium adsorption to clay-microbe aggregates: Implications for marine heavy metals cycling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 290, 124-136.
- [3] Mitchell, J. K., and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*. New York: John Wiley & Sons, 592.
- [4] Xu, H., Shu, S., Wang, S., Zhou, A., Jiang, P., Zhu, W., Chen, L. (2019). Studies on the chemical compatibility of soil-bentonite cut-off walls for landfills. *Journal of environmental management*, 237, 155-162.
- [5] Emami, S., Negahdar, A., Zarei, M. (2019). Investigating the influence of the leachate from the municipal solid waste on the mechanical and environmental properties of soil around the landfill (case study: The municipal landfill located in Ardabil—Iran). *Arabian journal for science and engineering*, 44(10), 8417-8428.
- [6] Varank, G., Demir, A., Adar, E., Bilgili, M. S., Top, S., Yazici Guvenc, S., Ozcoban, M. S. (2017). Investigation of Liner Systems in Transport of Organic and Inorganic Contaminants in Sanitary Landfill: A Case Study. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 45(1).
- [7] Ito, A., & Wagai, R. (2017). Global distribution of clay-size minerals on land surface for biogeochemical and climatological studies. *Scientific data*, 4(1), 1-11.
- [8] Sasanian, S. (2011). *The behaviour of cement stabilized clay at high water contents*. Doctor of Philosophy. The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science.
- [9] Environmental Protection Agency. (1983). *Process Design Manual—Land Application of Municipal Sludge*. EPA 625/1-83-016.
- [10] Arasan, S. (2010). Effect of chemicals on geotechnical properties of clay liners: a review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(8), 765-775.
- [11] Norouzi, A., Uygur, E., & Nalbantoglu, Z. (2022). A review on the effects of landfill leachate on the physical and mechanical properties of compacted clay liners for municipality landfills. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(12), 1-27.
- [12] Hamzah, A. J. (2010). The Potential of Kaolinite as a Landfill Liner Material. Doctor of Philosophy. UNIVERSITI MALAYSIA PAHANG, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources.
- [13] Ouhadi, V. R., Bahadori Nezhad, O. R., Amiri, M. (2014). Lead Retention of Carbonated Kaolinite in the Adsorption and Electrokinetics Processes. *Modares Journal of Civil Engineering*, 14(3). (In Persian).
- [14] Shariatmadari, N., Saiedijam, S., Ouhadi, V. R. (2009). Studying the effect of carbonate on the efficiency of the electrokinetic method in decontamination of heavy metal zinc from clay soils on a workshop scale. *Modares Journal of Civil Engineering*, 7(11), 45-59. (In Persian).
- [15] Li, L., Lin, C., & Zhang, Z. (2017). Utilization of shale-clay mixtures as a landfill liner material to retain heavy metals. *Materials & Design*, 114, 73-82.
- [16] Hassanlourad, M., Khatami, M. H., Ahmadi, M. M. (2017). Effects of sulphuric acid pollutant on the shear behaviour and strength of sandy soil and sand mixed with bentonite clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(2), 114-119.

- [17] Di Emidio, G., Verastegui-Flores, R. D., Mazzieri, F., & Dominijanni, A. (2017). Modified clays for barriers: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), 1-13.
- [18] Negahdar, A., & Nikghalbpour, M. (2020). Geotechnical properties of sandy clayey soil contaminated with lead and zinc. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1-13.
- [19] Liu, Y., Xiao, T., Zhu, Z., Ma, L., Li, H., & Ning, Z. (2021). Geogenic pollution, fractionation and potential risks of Cd and Zn in soils from a mountainous region underlain by black shale. *Science of the Total Environment*, 760, 143426.
- [20] Fereidoni, M., Lotfi, M., Rashid nejad, N., Rashidi, M. (2016). Evaluate geochemical trace elements of Qalikh oil shale (Southwest Aligoodarz) using elemental analysis and rock eval pyrolysis. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25(98), 171-180.
- [21] Bolt, G. H. (1956). Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays. *Geotechnique*, 6(2), 86-93.
- [22] Sridharan, A., Jayadeva, M. S. (1982). Double layer theory and compressibility of clays. *Geotechnique*, 32(2), 133-144.
- [23] Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Sedighi, M. (2006). Influence of heavy metal contaminants at variable pH regimes on rheological behaviour of bentonite. *Applied Clay Science*, 32(3-4), 217-231.
- [24] Dutta, J., Mishra, A. K. (2016). Consolidation behaviour of bentonites in the presence of salt solutions. *Applied Clay Science*, 120, 61-69.
- [25] Li, J. S. (2018). *Evolution Mechanism on Structural Characteristics of Lead-Contaminated Soil in the Solidification/Stabilization Process*. Doctoral Thesis .Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, China Springer.
- [26] Dutta, J., Mishra, A. K. (2017). Consolidation behavior of compacted bentonites in the presence of heavy metals. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 21(3), 04017003.
- [27] Miranda-Trevino, J. C., & Coles, C. A. (2003). Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH. *Applied Clay Science*, 23(1-4), 133-139.
- [28] Negahdar, A., Shabaniyan, M. R., Nikghalbpour, M., (2018). The Effect of Heavy Metal Contaminants on the Strength Parameters of Sandy Clay. *AMIRKABIR JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (AMIRKABIR)*, 50(5), 835-844. (In Persian).
- [29] Negahdar, A., Nikghalbpour, M., Shabaniyan, M. R., Ghadimi Ardebili, N., (2019). The Effect of Heavy Metal Contaminants on the Strength Parameters of Sandy Clay. *AMIRKABIR JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (AMIRKABIR)*, 51(2), 341-350. (In Persian).
- [30] Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003). *Frozen ground engineering*. 2<sup>nd</sup> edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 384.
- [31] Qi, J., Vermeer, P. A., & Cheng, G. (2006). A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. *Permafrost and periglacial processes*, 17(3), 245-252.
- [32] Marion, G. M. (1995). Freeze-Thaw Processes and Soil Chemistry. *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*.
- [33] Ouhadi, V. R., Kargar, L. (2013). Effects of freezing and thawing cycles on environmental geotechnical behavior of soils contaminated with heavy metals. In: *1<sup>st</sup> National Geotechnical Engineering Conference*. Ardabil.
- [34] Van den Bosch, T. J. H. (2015). *Influences of ice lens formation in a silty soil*. MSc Graduation Thesis. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- [35] Czurda, K. A. (1983). Freezing effects on soils: Comprehensive summary of the ISGF 82. *Cold Regions Science and Technology*, 8(2), 93-107.
- [36] Liu, J. K., & Peng, L. Y. (2009). Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil. *Cold Regions Science and Technology*, 58(1-2), 92-96.
- [37] Hohmann-Porebska, M. (2002). Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters. *Applied clay science*, 21(1-2), 77-87.
- [38] Kawaguchi, T., Nakamura, D., Yamashita, S., Yamasaki, S., Ishikawa, T. (2013). Effects of freeze-thaw history on deformation-strength properties and permeability of fine-grained soil. In: *Proc. of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 1, 357-360.
- [39] Simonsen, E., & Isacsson, U. (2001). Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(4), 863-875.
- [40] Konrad, J. M. (1990). A new concept of frost-heave characteristics of soils, by Otto J. Svec: Comments. *Cold regions science and technology*, 18(2), 219-222.
- [41] ASTM Committee D4318-17E01 on Soil and Rock. (2018). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. ASTM international.

- [42] ASTM Committee D854-14 on Soil and Rock. (2016). *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*: ASTM international.
- [43] Shelley, T. (1999). *Hand protection and glove selection. Including glove selection for some specific chemicals*.
- [44] Armour, M. A. (1988). Chemical waste management and disposal. *Journal of Chemical Education*, 65(3), A64.
- [45] Ouhadi, V. R., Haghayegh, A., Bayeste, H. (2008). The effect of heavy metal pollutants on the performance of sand and bentonite mixture (SEB) in engineering landfills. *Modares Journal of Civil Engineering*, 33. (In Persian).
- [46] ASTM Committee D560-D560M-16 (2016). *Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*. ASTM international.
- [47] ASTM Committee D2435-D2435M-11 on Soil and Rock. (2020). *Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading*. ASTM International.
- [48] Roy, W. R. (1992). Technical Resource Document: *Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals* (Vol. 87). Office of Solid Waste and Emergency Response, US Environmental Protection Agency.
- [49] Mukherjee, S. (2022). *Current topics in soil science: an environmental approach*. Springer Nature, 268.
- [50] Fang, H. Y., & Daniels, J. L. (2017). *Introductory geotechnical engineering*. 1<sup>st</sup> edition. Milton: Taylor & Francis.
- [51] Anandarajah, A., & Chen, J. (1994). Double-layer repulsive force between two inclined platy particles according to the Gouy-Chapman theory. *Journal of colloid and interface science*, 168(1), 111-117.
- [52] Li, J., Tang, Y., & Feng, W. (2020). Creep behavior of soft clay subjected to artificial freeze-thaw from multiple-scale perspectives. *Acta Geotechnica*, 15(10), 2849-2864.
- [53] Yong, R. N., Boonsinsuk, P., Tucker, A. E. (1984). A study of frost-heave mechanics of high-clay content soils. *ASME*, 106,502-508.
- [54] Zhang, W., Guo, A., & Lin, C. (2019). Effects of cyclic freeze and thaw on engineering properties of compacted loess and lime-stabilized loess. *Journal of materials in civil engineering*, 31(9), 04019205.
- [55] Ouhadi, V. R., Fakhimjou, M., Naeeni, S. O. (2017). Comparison of the changes plastic limit and permeability of bentonite in the presence of organic pollutants. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 46(85), 25-36. (In Persian).
- [56] He, H., Guo, J., Xie, X., & Peng, J. (2000). Experimental study of the selective adsorption of heavy metals onto clay minerals. *Chinese Journal of Geochemistry*, 19(2), 105-109.
- [57] Viklander, P. (1998). Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 471-477.
- [58] Konrad, J. M. (1989). Effect of freeze-thaw cycles on the freezing characteristics of a clayey silt at various overconsolidation ratios. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(2), 217-226.
- [59] Chang, D., & Liu, J. (2013). Review of the influence of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of soil. *Sciences in cold and arid regions*, 5(4), 457-460.
- [60] Wu, Y., Zhai, E., Zhang, X., Wang, G., Lu, Y. (2021). A study on frost heave and thaw settlement of soil subjected to cyclic freeze-thaw conditions based on hydro-thermal-mechanical coupling analysis. *Cold Regions Science and Technology*, 188, 103296.
- [61] Tang, Y. Q., & Yan, J. J. (2015). Effect of freeze-thaw on hydraulic conductivity and microstructure of soft soil in Shanghai area. *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 7679-7690.
- [62] Lu, J., Zhang, M., Zhang, X., Pei, W., & Bi, J. (2018). Experimental study on the freezing-thawing deformation of a silty clay. *Cold Regions Science and Technology*, 151, 19-27.