ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

شماره مجوز مجله:80400 **زمان پذیرش نهایی:99/07/20**

تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد بر خصوصیات مکانیکی خاک رس ماسه‌دار

مبین افضلی[1]؛ فرزاد بشری[2]؛ علی رضا رجب نژاد[3]*

1. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی قائمشهر، ایران
2. کارشناس ارشد، مهندسی عمران – مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی قائمشهر، ایران
3*. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران – زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی قائمشهر، ایران؛

چکیده

با توجه به ضعیف بودن خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه نظیر مقاومت برشی و ظرفیت باربری آنها، کاربرد این نوع خاکها در پروژه‌های عمرانی به عنوان مصالح قرضه و یا تکیه گاه سازه‌ها همواره با محدودیت‌هائی همراه بوده است. امروزه تکنیک‌های مختلف بهسازی خاک‌ها به منظور بهبود خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرند که هرکدام دارای ویژگی‌های فنی و اقتصادی خاص خود می باشند. استفاده از انرژی تراکم برای اصلاح خاک از دیرباز مورد توجه بوده است. علیرغم اثرات مثبت متراکم کردن خاک‌های ریزدانه، ارزیابی دوام خاک‌های بهسازی شده به ویژه در مناطق سردسیر که بیشتر در معرض ذوب و یخبندان‌های مکرر می‌باشند، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش تأثیر سیکل‌های مختلف انجماد – ذوب بر خصوصیات مقاومتی و شکل‌پذیری نمونه‌های متراکم شده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌هایی با 6 سطح انرژی متفاوت توسط دو چکش پروکتور استاندارد و اصلاح شده تهیه گردید. نمونه‌های آزمایشی ساخته شده از هر یک از سطوح مختلف انرژی تحت سیکل‌های انجماد – ذوب متفاوت شامل صفر، 1، 4، 7، 10 سیکل قرار گرفتند. سپس مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها پس از تحمل سیکل‌های ذوب و انجماد مورد نظر، تعیین گردید. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مختلف مشخص گردید که سطح مشخصی از انرژی تراکم وجود دارد که می‌توان از آن به عنوان انرژی بهینه یاد کرد که در آن سطح انرژی تراکم، ما کمترین کاهش مقاومت خاک و افزایش حجم خاک ناشی از اعمال سیکل‌های ذوب و انجماد است را داریم.

واژه‌های کلیدی: خاک رس ماسه‌دار، سیکل‌های ذوب و انجماد، انرژی تراکم، آزمایش پروکتور استاندارد و اصلاح شده

1- مقدمه

امروزه از روش‌های بهسازی خاک بطور گسترده‌ای در جهان استفاده می‌شود. کاربرد این روش‌ها باعث بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، کاهش هزینه، کوتاه شدن زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره برداری می‌گردد. روش‌های بهسازی خاک‌ها به منظور تغییر خصوصیات خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نهایت منجر به کاهش نشست سازه، بهبود مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری آن، افزایش ضریب اطمینان در مقابل لغزش شیروانی خاکریزها و سدهای خاکی، کاهش خصوصیات فشرده شدن و تورم خاک می‌شوند. اگر شرایط ژئوتکنیکی زمین برای احداث سازه مناسب نباشد ضروری است تمهیداتی مدنظر قرار گیرد که این امر بهسازی خاک نامیده می‌شود. یکی از روش‌های موثر در بهسازی خاک‌ها تراکم می‌باشد. تراکم خاک بطور گسترده‌ای در مهندسی عمران در پروژه‌های مختلف جهت تقویت خاک زیر شالوده‌ها، بستر راه‌ها و خاکریزها به کار گرفته شده است. طی این عمل دانه‌های خاک به‌هم نزدیک شده و هوای ما بین آنها خارج می‌شود. در اثر تراکم بخش‌های جامد و مایع (دانه‌ها و آب) ثابت و بدون تغییر می‌ماند و فقط حجم هوا کاهش می‌یابد. بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه مبین آن است که رفتار مقاومتی خاک‌ها به‌طور عمده پس از تراکم بهبود می‌یابد. و نتایج مثبتی از قبیل افزایش مدول‌های مقاومتی و سختی خاک، افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری خاک و همچنین پایداری بیشتر و افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌های خاکی ساخته شده را به همراه دارد. با توجه به نتایج مثبت تراکم خاک و کمبود تحقیق در مورد رفتار خاک‌های متراکم شده در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب شدن در این پژوهش از سطوح مختلف انرژی تراکم جهت بررسی مقاومت خاک بهسازی شده با انرژی تراکم در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب استفاده می‌شود. تا مشخص شود که آیا در خاک رسی بهسازی شده با انرژی تراکم می‌توان مقاومت و دوام را در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب افزایش داد یا خیر.

بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه در روسیه و چین منتشر شده‌اند و کمتر در دسترس محققان عمومی قرار دارند. 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. یخزدگی آب باعث افزایش در فشار یخ و کاهش در فشار آب حفره‌ای می‌شود. به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ای در جبهه یخزده آب از لایه‌های زیرین به طرف مرزهای یخزده و درون خاک‌های یخزده حرکت می‌کند، حتی اگر خاک هیچ راه دسترسی به آب‌های خارجی نداشته باشد. فشار آب حفره‌ای منفی بزرگ و حرکت آب باعث می‌شود ترک‌های انقباضی قائم در خاک زیر جبهه یخزده شکل بگیرند. با پیشروی جبهه یخزده این ترک‌ها با یخ پر شده سپس وقتی یخ‌ها ذوب می‌شوند ترک‌ها مجرایی برای جریان آب شده و نفوذپذیری خاک را افزایش می‌دهند. همچنین این ترک‌ها سبب کاهش در ظرفیت باربری خاک می‌شوند.

با مروری بر نوشتارهای منتشر شده معلوم شد که، تحقیقاتی در زمینه اثرات انجماد و ذوب شدن بر خصوصیات مکانیکی خاک‌ها صورت گرفته، اما اطلاعات کمی در ارتباط با اثر سیکل‌های انجماد و ذوب شدن بر مشخصات مکانیکی خاک‌های بهسازی شده با انرژی تراکم در دسترس می‌باشد و همچنین بیشتر روش‌های بهسازی یا تثبیت انجام شده علاوه بر صرف هزینه و وقت بالا سبب ایجاد آلودگی در محیط زیست می‌شوند.

در این پژوهش قصد بر آن است که اثر تکنیک بهسازی تراکمی خاک در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب در مناطق سردسیر مورد بررسی قرار گیرد. به طور کلی هدف از پژوهش کنونی در چهارچوب زیر قابل بیان است:

- بررسی مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس ماسه‌دار متراکم شده در سطوح انرژی مختلف پس از اعمال سیکل‌های ذوب و انجماد.

- بررسی مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس ماسه‌دار با افزایش انرژی تراکم تحت اثر سیکل‌های انجماد و آب شدن در مناطق سردسیر.

- بدست آوردن مقدار انرژی تراکمی که بتواند حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده را پس از تحمل سیکل‌های مختلف انجماد و آب شدن تحمل نماید.

- بررسی خصوصیات مکانیکی خاک رس ماسه‌دار متراکم شده و تغییرات آن پس از اعمال سیکل‌های ذوب و انجماد.

بهسازی خاک باعث افزایش و بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و کاهش هزینه‌های عمرانی می‌گردد. تاکنون روش‌های مختلفی نظیر زهکشی، تحکیم، ستون‌های سنگی، شمع و فرایندهای شیمیایی نظیر تثبیت و یا عناصر مسلح کننده، مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از روش‌هایی که از قدیم متداول بوده است، استفاده از تراکم[1] می‌باشد.

2- مروری بر سوابق

ونگ و همکاران[2] (2007) به بررسی اثر سیکل‌های انجماد و آب شدن بر روی خواص مکانیکی رس کانگای – تبت پرداختند. بر اساس یافته‌های این پژوهش در رابطه با مقاومت گسیختگی، مقدار آن پس از آنکه نمونه تحت اثر 3 تا 7 سیکل انجماد – آب شدن قرار گرفت به نقطه حداقل می‌رسد، و متعاقباً مقدار آن با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد – آب شدن تا رسیدن به سیکل 10 افزایش می‌یابد. وقتی که تعداد سیکل‌ها از 10 بیشتر شد، مقاومت گسیختگی خاک آزمایش شده علی‌رغم افزایش سیکل‌های انجماد – آب شدن ثابت می‌ماند. پیشنهاد می‌شود که مدول الاستیک و مقاومت گسیختگی خاکی که 7 سیکل انجماد – آب شدن را تجربه کرده برای طراحی مهندسی در مناطق سردسیر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین چسبندگی در خاک با افزایش شمار سیکل‌های انجماد – آب شدن کاهش می‌یابد، در حالی که زاویه اصطحکاک داخلی با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد – آب شدن تمایل به افزایش نشان می‌دهد [7].

لیو و همکاران[3] (2016) به بررسی اثر سیکل‌های انجماد – آب شدن بر روی خصوصیات مکانیکی ماسه سیلتی که از فلات چینگهای[4] تبت گرفته شده بود پرداختند [4]. استرپی[5] تأثیر سیکل‌های ذوب و آب شدن بر روی گرادیان هیدرولیکی یک سیلت رسی متراکم شده و اثر انرژی تراکم را مورد بررسی قرار داد [6]. قضاوی و روستایی[6] (2009) به بررسی اثر سیکل‌های انجماد – آب شدن بر مقاومت فشاری محصور نشده رس مسلح با الیاف پرداختند [3]. یونس فرد و همکاران (1389) به بررسی اثر آهک بر مقاومت خاک مارن در برابر پدیده یخبندان – ذوب پرداختند [2].

ماریا[7] (2001) به بررسی اثرات انجماد – آب شدن بر ساختار میکروسکوپی خاک‌های رسی و مخلوط‌های رس – بنتونیت در ارتباط با تغییرات نفوذپذیری و مقاومت برشی پرداخته است. در این پژوهش از تحلیل میکروسکوپ الکترونی جهت مطالعه مستقیم تغییرات

[1] compaction
[2] Wang et al.
[3] Liu et al.
[4] Qinghai
[5] Sterpi
[6] Ghazavi and Roustaie
[7] Maria

برودتی خاک‌های رسی به ویژه نزدیک به صفحه برشی و پس از آزمایشات نفوذپذیری استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییرات ساختار تصاعدی می‌باشد و قبل از انتقال به مرحله انجماد و در دامنه دمای منفی رخ می‌دهد. ساختار متراکم ایجاد شده توسط عدسی‌های یخ عموماً پایدار می‌باشند. بنابراین یک افزایش قابل توجه در نفوذ پذیری پس از انجماد – آب شدن مشاهده گردید. اثرات دمایی بر مقاومت برشی عمدتاً در چسبندگی خود را نشان می‌دهد [5].

گلچین فر و همکاران (1392) اثر ذوب و یخبندان‌های مکرر بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این پژوهش با توجه به اثرات مثبت افزودن آهک به خاک‌های ریزدانه و همچنین تسلیح این خاک‌ها توسط الیاف پلی پروپیلن، ارزیابی دوام خاک‌های تثبیت یا تسلیح شده به ویژه در مناطق سردسیر که بیشتر در معرض ذوب و یخبندان‌های مکرر هستند، را مورد بررسی قرار دادند [1].

بر مبنای مطالعه منابع فوق و محدود بودن مطالعه بر روی اثر سیکل‌های یخبندان – ذوب بر روی خاک‌های بهسازی شده با انرژی تراکمی در سطوح مختلف، لازم است تحقیقات بیشتری بر روی این موضوع صورت پذیرد. لذا، شایسته است به بررسی اثر انرژی تراکم در بهسازی خاک‌ها تحت شرایط یخبندان – ذوب پرداخته شود تا ضمن اصلاح خواص نامطلوب ناشی بهسازی خاک با انرژی تراکم اثر انجماد و ذوب در این شیوه بهسازی مد نظر قرار گیرد.

3- روش شناسی

اندازه‌گیری و تعیین مقاومت خاک‌ها که در مباحث پایداری خاک و مسائل ژئوتکنیکی اهمیت و کاربرد زیادی دارد، جزء مباحث پیچیده و مطرح مکانیک خاک می‌باشد. مقاومت خاک در قسمت‌های مختلف منحنی که معرف معیار گسیختگی مصالح است، اسامی مختلفی دارد که شامل مقاومت کششی، مقاومت برشی و مقاومت فشاری می‌باشد. لیکن می‌توان گفت مقاومت فشاری در اندازه‌گیری مقاومت برجا جهت کنترل پایداری کوتاه‌مدت پی و شیب‌ها و اندازه‌گیری حساسیت خاک حائز اهمیت می‌باشد. ساخت پی سبب تغییر تنش و معمولاً افزیش خالص تنش می‌شود. افزایش خالص تنش در خاک به میزان بار در واحد سطح پی، عمق مورد نظر تخمین تنش در زیر پی و عوامل دیگر بستگی دارد. آزمایش تک محوری یک روش سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده خاک‌های چسبنده است. این آزمایش برای خاک‌هایی قابل استفاده است که چسبندگی آنها برای تهیه آزمونه‌های پایدار که مقاومت خود را بعد از حذف فشار همه جانبه حفظ کنند. مانند رس‌ها و خاک‌های سیمانته شده کافی باشد. خاک‌های سیلتی، ماسه ای یا خاک‌های کلوخه‌ای و ترک خورده و پیت‌ها را نمی‌توان به این روش آزمایش کرد. در آزمایش تک محوری یک آزمونه از خاک مورد نظر تا رسیدن به گسیختگی تحت بار محوری به صورت کرنش کنترل قرار گرفته و مقاومت آن بر اساس تنش کل ایجاد شده در آزمونه در هنگام گسیختگی محاسبه می‌شود. آزمونه‌ها در این آزمایش بسته به شرایط مورد نظر طراح می‌توانند دست نخورده، بازسازی شده یا ساخته شده در آزمایشگاه با درصد تراکم و رطوبت مورد نظر باشند. در این پژوهش برای مدل کردن نمونه ساخته شده در آزمایشگاه با تراکم و درصد رطوبت مشخص از تست پروکتور استاندارد و اصلاح شده استفاده شد.

در این تحقیق تمامی نمونه‌ها در رطوبت بهینه خود ساخته شده و تحت تست تک محوری قرار گرفتند. با داشتن رطوبت‌های بهینه، خاک در تعداد ضربات مشخص و در وزن مخصوص حداکثر خود در پروکتورساخته شده و بعد از آن توسط رینگ‌های از قبل ساخته شده تست تک محوری، نمونه‌ها گرفته شد.

برای مدل کردن رطوبت بهینه در خاک با وزن مشخص از رابطه زیر استفاده شد:

$$\omega = \frac{W_W}{W_S}$$ (رابطه شماره 1)

که در این رابطه:

ω = درصد رطوبت بهینه

W_w = وزن آب (gr)

W_s = وزن خاک (gr)

ساخت قالب نمونه‌گیر و نمونه‌گیری و آماده‌سازی نمونه‌ها شامل مراحل زیر می‌شود:

- ساخت و تراشکاری نمونه‌گیر تست تک محوره؛

- تست تراکم با رطوبت بهینه مشخص شده از قبل؛

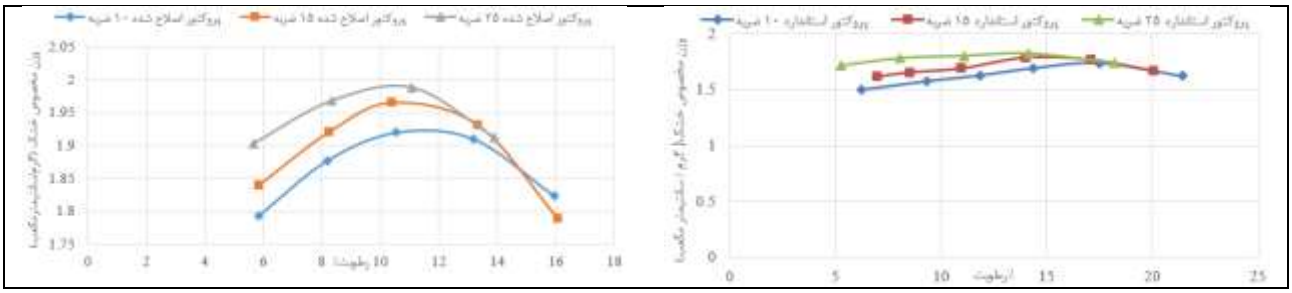
- گرفتن نمونه تک محوره از پروکتور؛

- اعمال سیکل‌های ذوب و انجماد.

4- نتایج و بحث

ابتدا به بررسی تغییرات رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر بدست آمده از آزمایش تراکم برای تعداد ضربات مختلف در خاک رس پرداخته می‌شود و پس از آن تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده سطوح انرژی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه جهت مقایسه رفتار مقاومتی مخلوط‌های مختلف، منحنی تنش – کرنش آنها ترسیم می‌شود و سپس تغییرات مدول الاستیک (E) با سیکل‌های مختلف انجماد و ذوب برای سطوح مختلف انرژی خاک رس مورد توجه قرار می‌گیرد. در خاتمه برای ارزیابی تغییرات ارتفاع نمونه، کرنش محوری برای نمونه‌هایی با سیکل‌ها و سطوح مختلف انرژی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج حاصل از آزمایش پروکتور استاندارد و اصلاح شده برای سطوح مختلف انرژی جهت محاسبه رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر برای خاک رس ماسه‌دار در قالب منحنی‌های تراکم در نمودارهای شماره (1) و (2) ارائه گردیده است.



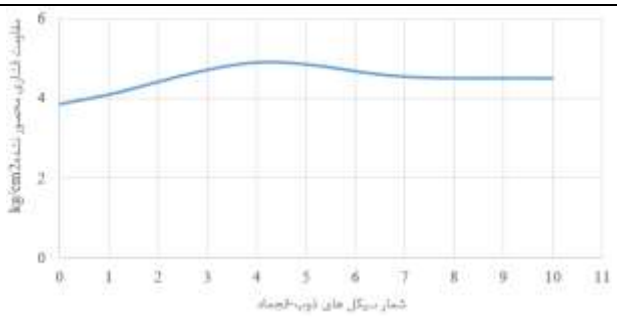
نمودار شماره (1): اثر تعداد ضربات و سطح انرژی پروکتور استاندارد بر مشخصات تراکمی خاک

نمودار شماره (2): اثر تعداد ضربات و سطح انرژی پروکتور اصلاح شده بر مشخصات تراکمی خاک

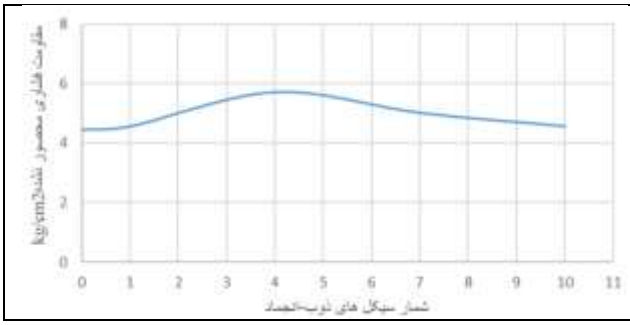
جدول شماره (1): مقادیر درصد رطوبت بهینه سطوح مختلف انرژی

آزمایش	نوع چکش	تعداد لایه	تعداد ضربات	مقدار انرژی $ft\text{-}lbf/ft^3$	رطوبت بهینه ٪
A	اصلاح شده	۵	۱۰	۲۲۵۰۰	۱۲/۵
B	اصلاح شده	۵	۱۵	۳۳۷۵۰	۱۰/۹
C	اصلاح شده	۵	۲۵	۵۶۲۰۰	۱۰/۲
D	استاندارد	۳	۱۰	۴۹۵۰	۱۷/۱
E	استاندارد	۳	۱۵	۷۴۲۵	۱۵
F	استاندارد	۳	۲۵	۱۲۴۰۰	۱۳/۵

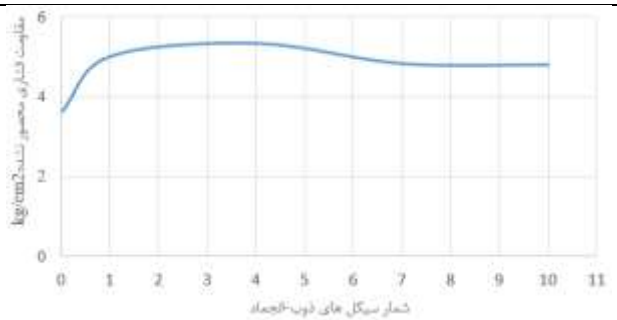
در تمامی 6 گروه، یک تست بدون اثر سیکل‌های انجماد – آب شدن جهت تعیین الگوی رفتاری مکانیکی عمومی رس ماسه‌دار مورد آزمایش قرار داده شد.



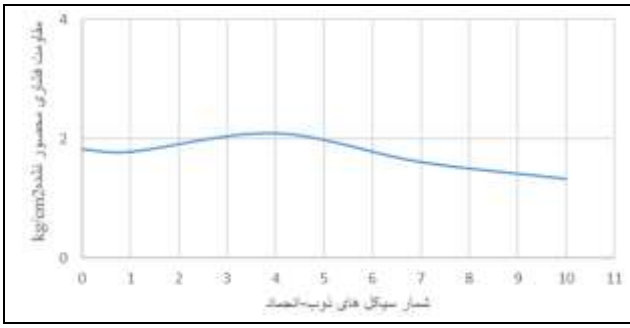
نمودار شماره (3): تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل سیکل‌های ذوب و انجماد برای نمونه‌های متراکم شده با سطح انرژی A



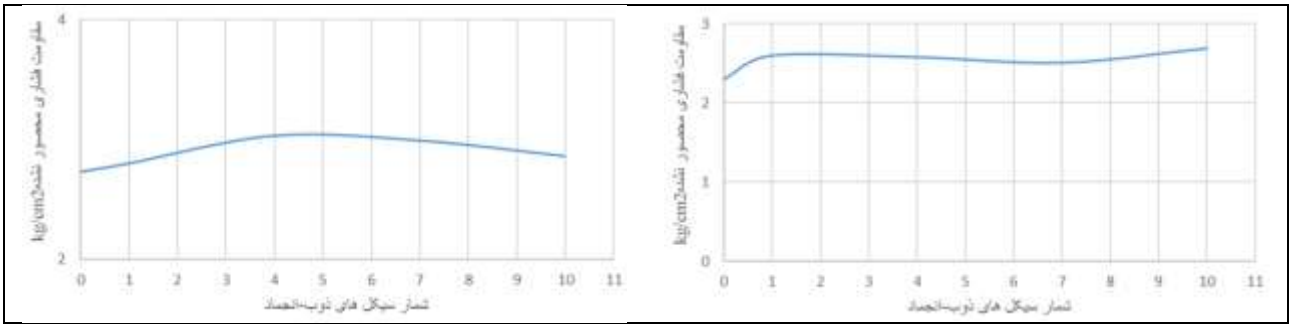
نمودار شماره (4): تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل سیکل‌های ذوب و انجماد برای نمونه‌های متراکم شده با سطح انرژی B



نمودار شماره (5): تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل سیکل‌های ذوب و انجماد برای نمونه‌های متراکم شده با سطح انرژی C



نمودار شماره (6): تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل سیکل‌های ذوب و انجماد برای نمونه‌های متراکم شده با سطح انرژی D

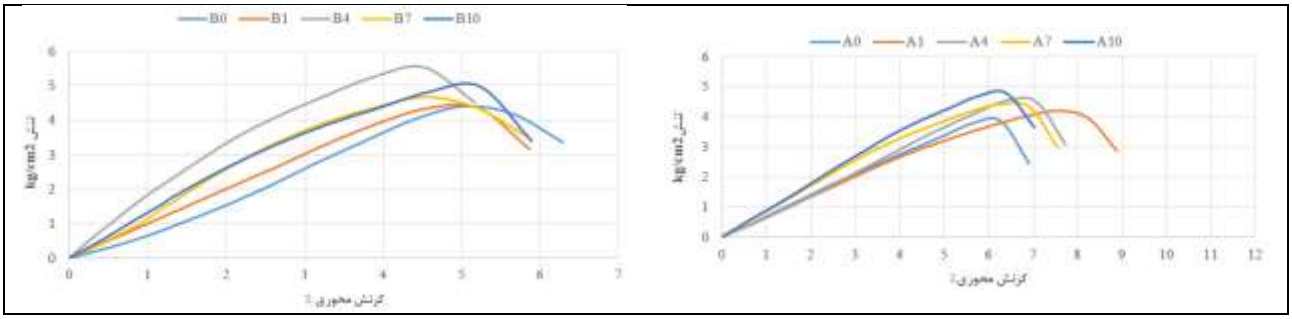


نمودار شماره (7): تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل سیکل‌های ذوب و انجماد برای نمونه‌های متراکم شده با سطح انرژی E

نمودار شماره (8): تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل سیکل‌های ذوب و انجماد برای نمونه‌های متراکم شده با سطح انرژی F

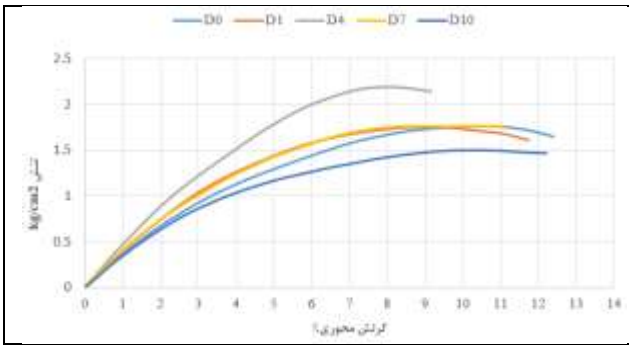
جهت بررسی تغییرات مدول الاستیک (E) در مقابل سیکل‌های انجماد و ذوب برای سطوح مختلف انرژی در خاک رس ماسه دار ابتدا باید منحنی‌های تنش – کرنش نمونه‌های مختلف ترسیم گردد. بدین ترتیب با ترسیم منحنی‌های تنش – کرنش می‌توان به بررسی تغییرات در خصوصیات شکست و رفتار مقاومتی نمونه‌های مختلف پرداخت.

در نمودارهای شماره (9) تا (14) منحنی‌های تنش – کرنش نمونه‌های خاک رس ماسه‌دار در سطح انرژی ثابت و سیکل‌های ذوب – انجماد متفاوت نشان داده شده است.



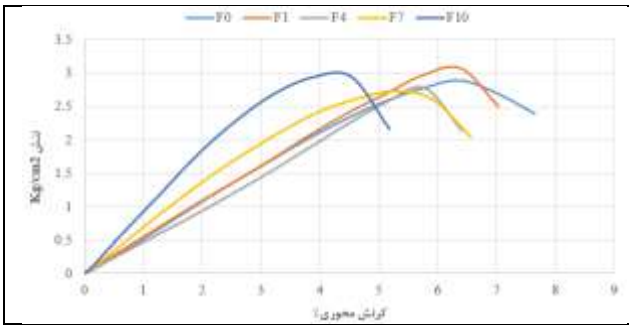
نمودار شماره (9): تنش – کرنش در انرژی ثابت و سیکل متغیر، سری A

نمودار شماره (10): تنش – کرنش در انرژی ثابت و سیکل متغیر، سری B



نمودار شماره (11): تنش – کرنش در انرژی ثابت و سیکل متغیر، سری C

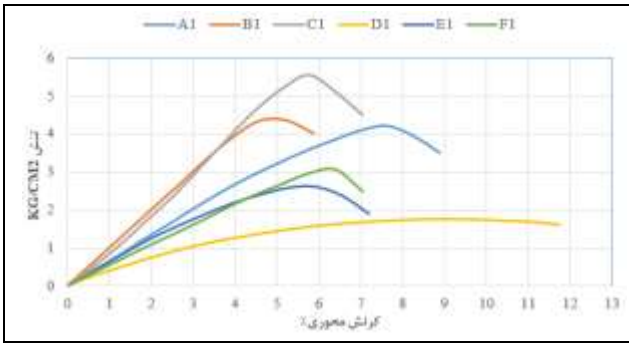
نمودار شماره (12): تنش – کرنش در انرژی ثابت و سیکل متغیر، سری D



نمودار شماره (13): تنش – کرنش در انرژی ثابت و سیکل متغیر، سری E

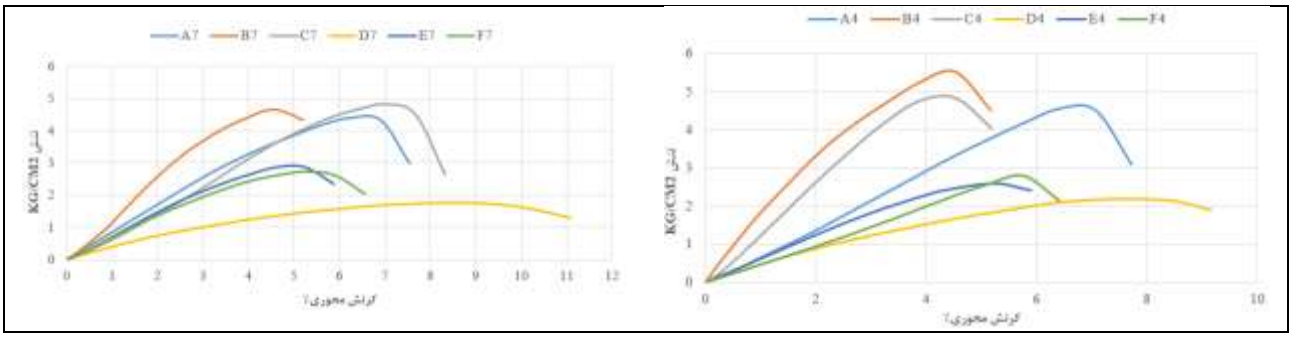
نمودار شماره (14): تنش – کرنش در انرژی ثابت و سیکل متغیر، سری F

در نمودارهای شماره (15) تا (19) منحنی‌های تنش – کرنش نمونه‌های خاک رس ماسه‌دار در سطح انرژی متغیر و سیکل ذوب – انجماد ثابت نشان داده شده است.



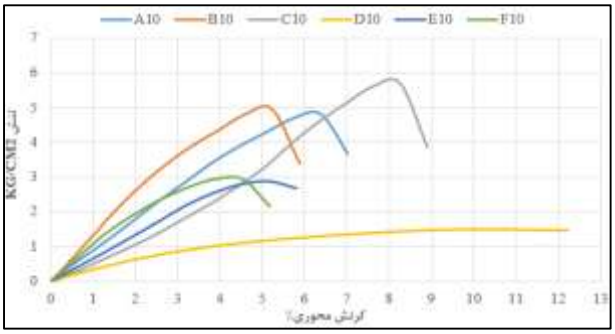
نمودار شماره (15): تنش – کرنش در سیکل ثابت و انرژی متغیر، سیکل صفر

نمودار شماره (16): تنش – کرنش در سیکل ثابت و انرژی متغیر، سیکل یک



نمودار شماره (17): تنش – کرنش در سیکل ثابت و انرژی متغیر، سیکل چهار

نمودار شماره (18): تنش – کرنش در سیکل ثابت و انرژی متغیر، سیکل هفت



نمودار شماره (19): تنش – کرنش در سیکل ثابت و انرژی متغیر، سیکل ده

همان‌طورکه از نمودارهای تنش-کرنش بالا مشخص است، رفتار رس آب شده از نوع نرم شونده با افزایش تراکم به نوع سخت شونده تبدیل می‌شود. همچنین تغییرات مدول الاستیک خاک در برابر تعداد سیکل‌های انجماد – آب شدن در نمودار شماره (20) نشان داده شده است.

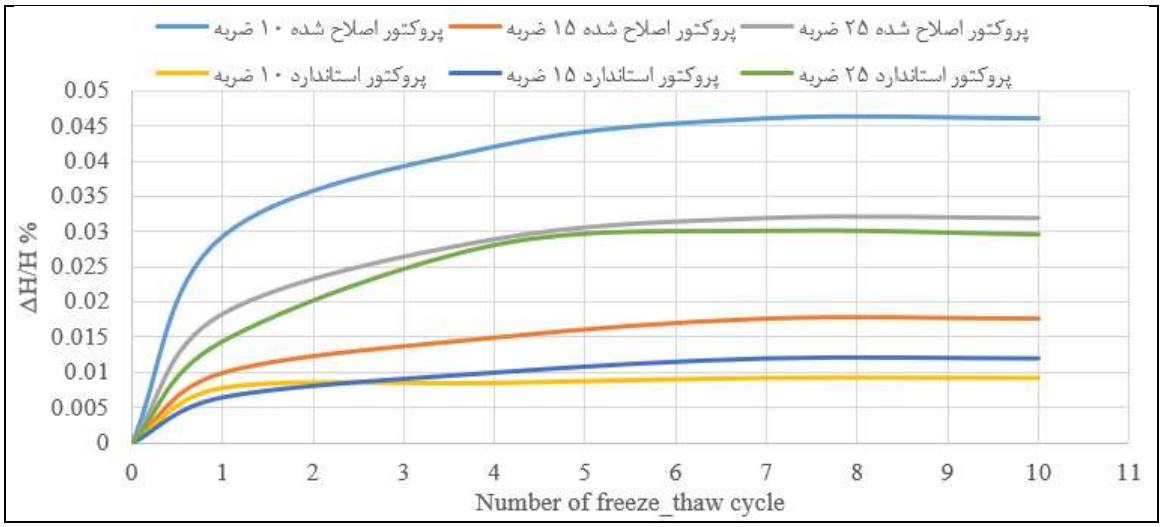
نمودار شماره (20): مدول الاستیک خاک‌ها در برابر تعداد سیکل‌های انجماد – آب شدن

در اثر انجماد رطوبت آب موجود در خاک منجمد شده و سبب افزایش حجم خاک می‌گردد. لذا، با توجه به اهمیت موضوع قابلیت تورم یک خاک بهسازی شده در مناطق سردسیر لازم است تا شاخصی جهت اندازه‌گیری تغییرات حجمی خاک در اثر سیکل‌های انجماد و ذوب تعریف گردد. در پژوهشی که توسط ونگ و همکاران (2006) [7] در ارتباط با بررسی اثر سیکل‌های انجماد و آب شدن بر روی خواص مکانیکی رس ماسه‌دار انجام شد، جهت بررسی این موضوع کرنش محوری، مطابق رابطه شماره (2) تعریف گردید:

$$B = \frac{\Delta H}{H_0}$$ (رابطه شماره 2)

که در آن ΔH مبین افزایش ارتفاع بدست آمده در خاک آب شده پس از N سیکل انجماد – ذوب، و H_0 ارتفاع اندازه گیری شده اولیه در خاک منجمد نشده بود.

تغییرات ارتفاع نمونه‌های مختلف متراکم شده با سطوح مختلف انرژی تراکم و سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب در نمودار شماره (21) نشان داده شده است.



نمودار شماره (21): تغییرات ارتفاع نمونه‌های مختلف رس ماسه‌دار

5- نتیجه‌گیری

به طور کلی تقویت خاک‌های ضعیف و نامناسب جهت به‌کارگیری در پی‌ها، بستر جاده‌ها، سدهای خاکی و ... برای ایجاد پیکربندی خاکی با ویژگی‌های مهندسی دلخواه بهسازی خاک نامیده می‌شود. روش تراکم خاک به دلیل هزینه پایین، اجرای آسان و تأثیر زیاد آن در بهبود خواص خاک به عنوان روشی مناسب برای بهسازی و اصلاح خاک شناخته می‌شود. در این پژوهش با تراکم خاک رس در سطوح مختلف انرژی تراکم و اعمال سیکل‌های مختلف انجماد و ذوب، تغییرات مقاومتی، حجمی و خصوصیات شکل‌پذیری نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مجموعه نتایج آزمایشات و بررسی‌های به عمل آمده در این پژوهش نتیجه‌گیری‌های زیر قابل ارائه می‌باشند:

1) نتایج حاصل از آزمایش تراکم هاروارد برای مخلوط‌های مختلف خاک رس، همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد افزایش سطح انرژی به خاک سبب تغییرات محسوسی در وزن مخصوص خشک حداکثر شده است. دلیل این امر بر اساس اصول اولیه مکانیک خاک تأثیر سطح انرژی بالاتر و ایفای نقش آب بهینه به عنوان یک روان‌کننده می‌توان بیان کرد.

2) خاک رس ماسه‌دار معمولی متراکم نشده مقاومت خود را تنها پس از تحمل یک سیکل انجماد و ذوب از دست داده و پس از آن نمونه‌ها مقاومتی ندارند.

3) در مناطق سردسیر جهت حفظ مقاومت، تنها اصلاح خاک با تراکم جواب‌گو نمی‌باشد و افت مقاومت در اثر اعمال سیکل‌های انجماد و ذوب یخبندان قطعی می‌باشد. در هر حال ترکیبی کاملاً مقاوم در برابر کلیه سیکل‌های انجماد و ذوب یخبندان از بهسازی خاک رس ماسه‌دار با تراکم دینامیکی حاصل نمی‌شود.

4) نمونه‌هایی که در سطوح انرژی پایین‌تری متراکم شدن در طی اعمال سیکل‌های ذوب و انجماد شاهد بازه تغییراتی مقاومت کمتری نسبت به نمونه خاک‌های رسی متراکم شده در سطوح بالاتر انرژی بودند.

5) نکته قابل توجه در اکثر نمونه‌های خاک رس ماسه‌دار با سطوح مختلف انرژی تراکم این است که با افزایش سیکل‌های ذوب و انجماد تا سیکل چهارم مقاومت فشاری محصور نشده افزایش یافته و پس از آن روند کاهشی به خود می‌گیرد اما در پایان سیکل دهم همچنان مقدار مقاومت فشاری محصور نشده از سیکل صفر بیشتر است.

6) در سطح انرژی D ($4950\ ft\text{-}lbf/ft^3$) که کمترین سطح انرژی وارده در این پژوهش می‌باشد مشاهده می‌گردد که بر خلاف تمامی نمونه‌ها و سطوح انرژی مختلف دیگر، مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه‌ای که ده سیکل ذوب و انجماد را تحمل کرده است نسبت به نمونه‌ای که هیچ سیکل ذوب و انجمادی به آن اعمال نشده است کمتر است.

7) مدول الاستیک در خاک رس ماسه‌دار در تمام سطوح انرژی تراکم در سیکل‌های اول روند افزایشی دارد و پس از سیکل چهارم به‌صورت کاهشی می‌شود و این روند پس از سیکل هفتم ثابت می‌شود.

8) در نمودار (تعداد سیکل – مدول الاستیک) هرچه سطح انرژی تراکمی افزایش یابد زاویه افزایش مدول الاستیک و تغییرات آن شدیدتر خواهد بود.

9) در خاک‌های رس ماسه‌دار متراکم شده تغییرات فاحشی در منحنی تنش – کرنش به وجود می‌آید، مدول ارتجاعی (شیب منحنی) شدیداً افزایش یافته و ضمناً شکست به صورت کاملاً ترد انجام می‌پذیرد. همچنین منحنی‌ها دارای نقطه حداکثر تنش محوری مشخصی می‌باشند. اما در هر حال با افزایش شمار سیکل‌های انجماد و ذوب یخبندان مقاومت کاهش یافته و گسیختگی تردتر می‌شود که این روال کاهش مقاومت و تردتر شدن گسیختگی با افزایش انرژی تراکمی در یک سیکل انجماد – ذوب ثابت بیشتر می‌شود.

10) خصوصیات شکست در منحنی‌های تنش – کرنش مربوط به نمونه خاک رس ماسه‌دار متراکم شده به صورت ترد می‌باشد، به عبارت دیگر به وقوع گسیختگی در کرنش‌های پایین رخ می‌دهد.

11) در خاک‌های رسی متراکم شده با انرژی تراکم با افزایش سیکل‌های ذوب و انجماد با افزایش ارتفاع مواجه هستیم و این روند تا سیکل هفتم افزایش و پس از آن ثابت می‌شود. پس از آن افزایش سیکل ذوب و انجماد دیگری تغییری رخ نخواهد داد.

12) فارغ از تأثیر میزان تراکم در مقدار مقاومت فشاری تک محوری، می‌توان به این موضوع اشاره کرد که در سطح انرژی F ما کمترین بازه در کاهش مقدار مقاومت خاک را در سیکل دهم نسبت به خاکی که تحت تأثیر هیچ سیکلی قرار نگرفته است را شاهدیم.

13) مقدار تغییرات و افزایش در مدول الاستیک سطح انرژی F به‌صورت تقریبی از تمامی نمونه‌ها کمتر می‌باشد.

14) با توجه به نتایج شماره 12 و 13 می‌توان به این نتیجه رسید که خاک رس ماسه‌دار در یک سطح انرژی مشخص (F) کمترین کاهش در بازه تغییراتی مقاومت خاک و کمترین افزایش در مقدار مدول الاستیک خاک را داراست و این امر نشان دهنده یک سطح انرژی تراکمی بهینه می‌باشد که در آن ما کمترین تغییرات در مقاومت و مدول الاستیک و ارتفاع خاک را دارا می‌باشیم.

15) در خاک‌های رسی متراکم شده با سطوح مختلف انرژی تغییرات فاحشی در اکثر منحنی‌های تنش و کرنش به وجود می‌آید، مدول ارتجاعی (شیب منحنی) شدیداً افزایش یافته و شکست به صورت کاملاً ترد انجام می‌پذیرد.

16) در خاک‌های رسی متراکم شده در سطوح مختلف انرژی تراکم، با افزایش انرژی تراکم رفتار گسیختگی نمونه تردتر می‌شود. لذا، باید سطح انرژی معینی وجود داشته باشد که در آن رفتار گسیختگی نمونه نه ترد و نه نرم باشد و به عبارتی در آن حالت باید نمونه پایداری ویژه‌ای داشته باشد. به‌گونه‌ای که افزایش شمار سیکل‌های یخبندان و ذوب نیز نتواند موجب تغییر رفتار گسیختگی نمونه شود.

پیشنهاد می‌شود که مدول الاستیک و مقاومت گسیختگی خاکی که 7 سیکل انجماد – آب شدن را تجربه کرده برای طراحی مهندسی در مناطق سردسیر مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

1. گلچین فر، ن.، عباسی، ن.، "اثر ذوب و یخبندان‌های مکرر بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف پلی پرو پیلن"، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر 2، ص 1-12، زمستان 1392.

2. یونس فرد، م.، روشن ضمیر، م.، زمردیان، م.، "بررسی تأثیر آهک بر مقاومت خاک مارن در برابر سیکل‌های یخبندان – ذوب"، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک، 1389.

3. Ghazavi, M., Roustaie, M., “The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay”, Cold Regions Science and Technology 61, 125-131, 2010.

4. Liu, J., Chang, D., Yu, Q., “Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand”, Engineering Geology 210, 23-32, 2016.

5. Maria, H., “Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters”, Department of Applied Geology, Karlsruhe university, Germany, 2001.

6. Sterpi, D., “Effect of freeze-thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy”, Soil and Foundations 55(5), 1326-1332, 2015.

7. Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X., Wen, Z., “Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay”, Cold Regions Science and Technology 48, 34-43, 2007.