یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

اثر فرآیند یخبندان و ذوب بر تراکم‌پذیری خاک

مجتبی جابری معز۱*، علی جعفری۱، علیرضا کیهانی۱ و مهدی شرفا۲

۱- گروه آموزشی مهندسی بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۲- گروه آموزشی مهندسی علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، داشگاه تهران
*مسئول مکاتبه: jaberimoeaz@yahoo.com

چکیده

یکی از فرآیندهای مؤثر بر ساختمان خاک، فرآیند یخبندان و ذوب است. فرآیند یخبندان و ذوب بر تراکم‌پذیری خاک تأثیر گذاشته و آستانه تراکم‌پذیری (ظرفیت باربری یا تنش پیش‌تراکمی) را تغییر می‌دهد. به همین منظور اثر این فرآیند بر ظرفیت باربری خاک و همچنین میزان انرژی مصرفی در حین تراکم خاک موردمطالعه قرار گرفت. در این پژوهش نمونه‌های خاک با حجم ۴۴۰۰ سانتی‌متر مکعب در دو سطح رطوبتی ۱۰ و ۱۵ درصد با سه چگالی ظاهری ۱/۱۵ و ۱/۲۶۵ و ۱/۳۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب تهیه و تحت تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب قرار گرفتند و نتایج با نمونه‌های مشابه ولی بدون تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب (تیمار شاهد) مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که فرآیند یخبندان و ذوب تأثیر معنی‌داری بر ظرفیت باربری و انرژی مورد نیاز جهت تراکم خاک داشته و باعث کاهش هر دو کمیت شد. هر چند این فرآیند ساختمان خاک را بهبود بخشیده و آن را اصلاح می‌نماید ولی اعمال هر بار فشاری بیش از تنش پیش‌تراکمی، علاوه بر از بین بردن اثرات مفید یخبندان و ذوب بر ساختمان خاک، باعث تراکم بیشتر خاک نیز می‌شود. لذا به‌کارگیری ادوات و ماشین‌ها در مزرعه باید با دقت و متناسب با شرایط فیزیکی خاک با توجه به عوامل تأثیرگذار بر آن باشد.

واژه‌های کلیدی: انرژی ذخیره شده در خاک، تنش پیش‌تراکمی، دما، تراکم‌پذیری

Effects of Freezing and Thawing Process on Soil Compressibility

Abstract

One of the factors affecting soil structure is freezing and thawing process. It could change soil compressibility threshold (bearing capacity or pre-compression stress). For this purpose, the effect of freezing and thawing process on the bearing capacity and energy consumption during soil compression was studied. The soil samples in this study were prepared in two humidity levels of 10% and 15%, with the density of 1.15, 1.265 and 1.39 g/cm^3. They were affected by freezing and thawing process and the results were compared with the similar samples without thaw-freeze process. The results showed that soil thawing and freezing process has reduced significantly the bearing capacity and required energy for soil compaction. Although this process improves and modifies soil structure, but any excessive pressure over normal load, not only eliminates the beneficial effects of freezing and thawing on soil structure, but also causes more soil compaction. Therefore, the use of machines and implements on farms must be carefully according to soil physical properties and the factors affecting it.

Keywords: Stored energy in soil, Pre-compression stress, Temperature, Compressibility

۱- مقدمه

خاک به‌عنوان یک منبع طبیعی در جهان امروز ارزش بسیاری دارد. با وجودی که زندگی ما بیش از هر زمان دیگری وابسته به خاک است، روابط انسان‌ها با این منابع چه از لحاظ فیزیکی و چه به لحاظ احساسی بسیار ضعیف شده است. در سطح جهانی تخریب خاک به دست انسان یک مشکل جدی است. تخریب فیزیکی خاک در این راستا اهمیت ویژه‌ای دارد. ازجمله مؤلفه‌های اصلی تخریب فیزیکی خاک، تراکم خاک، ماندآب شدن و نشست خاک‌های آلی می‌باشد. از جمله عوامل مهم تخریب فیزیکی خاک، تراکم می‌باشد که حدود ۸۱/۹ درصد از کل سطح تخریب فیزیکی خاک را در برمی‌گیرد (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱). تراکم خاک یکی از مشکلات عمده در کشاورزی مدرن محسوب می‌شود. استفاده مکرر از ماشین‌های کشاورزی سنگین در شرایط

رطوبتی نامناسب، خاک‌ورزی، کاشت و چرای بیش‌از حد منجر به تراکم خاک می‌شود (حمزا و اندرسون، ۲۰۰۵). در همه اقلیم‌های جهان تراکم خاک موجب ایجاد مشکلاتی در مدیریت خاک و گیاه در حیطه زراعت، باغبانی و جنگل گردیده است. تراکم زیاد خاک سبب تأثیرهای نامطلوبی همچون کاهش نفوذ آب در خاک، افزایش رواناب، افزایش انرژی خاک‌ورزی و محدودیت توسعه ریشه می‌گردد و در نهایت ممکن است به کاهش محصول و تنزل کیفیت خاک منجر شود (آراگون و همکاران، ۲۰۰۰). تراکم خاک منجر به تغییر آرایش فضایی خاک و در نتیجه خلل و فرج درون و بین خاکدانه‌ها می‌گردد. همچنین تراکم خاک علاوه بر ویژگی‌های ساختمانی خاک، بر هدایت گرمایی و آبی و انتقال گازها در خاک تأثیر گذارده و این تغییرات به‌نوبه خود بر تعادل زیستی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارند (شاینبرگ و همکاران، ۱۹۸۲). در سال‌های اخیر به دلیل افزایش اندازه مزارع و افزایش وزن ماشین‌های کشاورزی و توسعه کشت‌های متراکم بدون توجه به پایداری فیزیکی خاک، تراکم خاک مورد توجه قرار گرفته است (راگوان و همکاران، ۱۹۹۰؛ شافر و همکاران، ۱۹۹۲). تعیین درجه تراکم‌پذیری خاک، نیازمند تعیین شاخصی برای نشان دادن میزان تغییر در ویژگی‌های خاک در مقابل اعمال تنش است (کالی، ۱۹۹۳). خصوصیات مکانیکی خاک در تعیین حدود تنش مجاز برای جلوگیری از تراکم، مهم می‌باشد. از جمله این شاخص‌های مهم، تنش پیش تراکمی و شاخص تراکم می‌باشند که تنش پیش تراکمی اغلب به‌عنوان معیاری از ظرفیت باربری خاک استفاده می‌شود (کلر و آرویدسون، ۲۰۰۷؛ روکناگل و همکاران، ۲۰۱۰).

هرگاه خاک تحت تأثیر تنش‌های کوچک‌تر از تنش پیش تراکمی قرار گیرد، تغییر شکل خاک عمدتاً برگشت پذیر خواهد بود ولی در تنش‌های بزرگ‌تر تغییر شکل خاک ماندگار می‌با شد (کاوالیری و همکاران، ۲۰۰۸). به عبارت دیگر در تنش‌های بزرگ‌تر خاک تغییر حجم پیدا کرده و متراکم‌تر می‌شود. هدف اصلی از تعیین تنش پیش تراکمی، تعیین ظرفیت باربری خاک یا تنش در آستانه تراکم می‌باشد (آلکساندرو و ایرال، ۱۹۹۵). تنش پیش تراکمی معیار مناسبی برای ارزیابی استحکام و تراکم‌پذیری خاک است (روکناگل و همکاران، ۲۰۱۰).

برای محا سبه پارامترهای مربوط به تراکم خاک از آزمایش‌هایی نظیر فشردگی تک‌محوری، فشردگی محصور و آزمون نشست صفحه‌ای ا ستفاده می شود. آلکساندرو و ایرال (۱۹۹۵) اولین بار روش (آزمون نشست صفحه‌ای) PST[1] آزمایش را جهت تخمین σ_p استفاده کردند. در این آزمایش بر یک صفحه روی سطح خاک بارگذاری قائم صورت گرفته و منحنی بار- نشست ترسیم می‌گردد که چگونگی رفتار خاک در مقابل بارمحوری فشاری را نشان می‌دهد. مصدقی و همکاران (۲۰۰۶) روش‌های PST و (آزمون فشردگی محصور) CCT[2] در برآورد تراکم‌پذیری و تعیین تنش پیش‌تراکمی خاک مزرعه و عوامل مؤثر بر آن را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان بیان کردند که روش PST در مقایسه با روش CCT تخمین بهتری از تنش پیش‌تراکمی واقعی ایجاد شده توسط عبور تراکتور در مزرعه به دست می‌دهد. دلیل این امر بدین‌صورت بیان شد که روش PST به دلیل دست‌نخورده بودن و تفاوت شرایط مرزی خاک زیر صفحه بارگذاری با شرایط مرزی داخل ا ستوانه در آزمایش CCT مقادیر تنش پیش‌تراکمی مقادیر بالاتر و نزدیک‌تر به فشار تما سی تراکتور به د ست می‌آید. از جمله عوامل تعیین‌کننده تراکم خاک، بافت خاک و ساختمان خاک ا ست که بافت خاک در شرایط معمول تغییر نمی‌کند ولی ساختمان خاک تحت تأثیر عوامل و شرایط مختلف مانند تر و خ شک شدن، مواد آلی خاک، یخبندان و ذوب، انقباض و انبساط و بارهای وارد بر خاک تغییر می‌کند. در مناطق سردسیر دمای هوا مکرر به زیر صفر رسیده و در صورت تأمین رطوبت خاک، فرآیند یخبندان اتفاق می‌افتد. عموماً بارندگی‌ها در فصول سرد سال در مناطق مختلف اتفاق می‌افتد و این امر باعث تشکیل بلورهای یخ در داخل خاک می‌شود و بسته به دمای هوا و شرایط خاک و مدت‌زمان یخبندان، عمق یخبندان خاک تغییر می‌کند. یخبندان و ذوب فرآیندی اســت که خاک را از یک حالت ناپایدار، به یک حالت پایدار دینامیکی سوق می‌دهد و اگر این فرآیند تکرار شود، ساختمان خاک به سمت یک حالت پایدار دینامیکی جدید می‌رود (چنگ سونگ و همکاران، ۲۰۰۳). وقتی سطح خاک در معرض جریان هوای سرد قرار می‌گیرد، آب خالص سطح نمونه شروع به یخ زدن می‌کند. در این حالت یک اختلاف دما بین ناحیه یخزده و ناحیه یخ نزده ایجاد شده و مکش در ناحیه یخزده آغاز شده و گسترش می‌یابد. در این حالت آب از منطقه یخ نزده به سمت ناحیه یخزده حرکت کرده و به مقدار آب در حال یخ زدن می‌افزاید (آندرسلند و لادانی، ۲۰۰۴). داش (۱۹۸۹) بیان نمود که حرکت آب از افق پایین به سمت لایه تازه یخ زده نتیجه چندین مکانیزم ا ست. اول از همه گرادیان دما در خاک ا ست که باعث حرکت رو به بالای آب به ناحیه با دمای سردتر می شود. اگر لایه بالایی قابل نفوذ با شد، بخار آب موجود در زمین متصاعد شده و از د سترس خاک خارج می شود. دومین دلیل حرکت آب از لایه‌های زیرین، خا صیت ا سمزی ا ست. از آنجا که یخ تقریباً از آب خالص تشکیل شده ا ست، آب یخ نزده اطراف یخ دارای یون فراوانی ا ست. در حالی که آب سطوح پایین دارای یون کمتری ا ست. به همین دلیل آب سطوح پایین تمایل به حرکت به سمت سطوح بالا که دارای یون بیشتری ا ست، دارد. دلیل سوم کشش بین آب و یخ ا ست. وقتی هسته یخ تشکیل شد، با رشد یخ در صورت ارتباط بین آب اطراف یخ و آب لایه‌های پایین، آب به سمت هسته یخ مکیده می شود. با تغذیه جریان آب از لایه‌های پایین خاک، ضخامت یخ افزایش یافته و به چند سانتی‌متر می‌رسد. رشد لایه یخ با آب موجود و میزان حرکت آن به سمت لایه یخ کنترل می‌شود. اگر یخ زدن آب لایه‌های پایین خیلی سریع اتفاق بیفتد، قبل از این‌که آب به لایه یخزده برسد، منجمد شده و حرکت آن متوقف می‌شود. در هنگام یخ زدن حجم آب یخزده به‌اندازه ۹ درصد افزایش حجم پیدا کرده که این خود باعث افزایش حجم خاک یخ زده

[1] Plat Sinkage Test
[2] Confined Compression test

نیز می شود (وانگ و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین به دلیل افزایش مقدار آب در منافذ خاک ناحیه یخزده و افزایش حجم آن در حین یخ زدن، حجم منافذ و در کل حجم خاک یخ زده افزایش می‌یابد.

هنگامی‌که دمای خاک به زیر صفر می‌رسد، آب خالص داخل خاک تبدیل به یخ می شود. یخ می‌تواند ذرات خاک را جابه‌جا کرده و اجزاء خاک را از هم جدا کند. اغلب در حین یخبندان در خاک، اتصال بین ذرات خاک شکسته و ساختمان خاک تغییر می‌کند و همچنین تخلخل، دانسیته، ظرفیت نگهداری آب و هدایت هیدرولیکی خاک تغییر کرده که آن در اثر تغییر در چسبندگی و استحکام خاک است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۷).کی و همکاران (۲۰۰۳) در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که خواص مکانیکی خاک به‌شدت تحت تأثیر پیوند یخ با اجزاء خاک در طی دوره یخبندان و همچنین آب حاصل از ذوب یخ می‌باشد. ایگنبرود (۱۹۹۶) در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که خاک‌هایی که به دلیل پوشش لایه بالایی خود در معرض چرخه ذوب و یخبندان قرار نگرفته‌اند، وقتی تحت تأثیر این پدیده قرار می‌گیرند، ظرفیت تحمل بار آن‌ها کاهش پیدا کرده و خاک آسیب می‌بینند. کی و همکاران (۲۰۰۸) طی آزمایش‌هایی به این نتیجه رسیدند که در اثر یخبندان خاصیت چسبندگی خاک کاهش پیدا کرده و هر اندازه دمای خاک پایین‌تر باشد، خاصیت چسبندگی نیز کاهش خواهد یافت ولی ضریب اصطکاک داخلی خاک به‌آرامی افزایش می‌یابد. در نتیجه استحکام برشی خاک که منتج از این دو مؤلفه است، کاهش می‌یابد. همچنین ایشان دریافتند که با افزایش جرم حجمی خاک چسبندگی خاک بعد از چرخه ذوب و یخبندان ابتدا تا حد معینی افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. ایشان بیان نمودند که یک حد بحرانی برای جرم حجمی خاک وجود دارد که چسبندگی خاک در آن حد تحت تأثیر چرخه ذوب و یخبندان قرار نمی‌گیرد. این حد بحرانی برای تغییرات ضریب اصطکاک داخلی نیز وجود دارد. زاویه اصطکاک داخلی در جرم حجمی کمتر خیلی آرام تغییر می‌کند تا حد بحرانی و بعد از آن با افزایش جرم حجمی نسبت به خاک تیمار نشده افزایش پیدا می‌کند. آندرسلند و لادانی (۲۰۰۴) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که وقتی خاک تحت تأثیر یخبندان و ذوب قرار می‌گیرد آب خالص به یخ تبدیل می‌شود به دلیل این‌که آب خالص پس از یخبندان افزایش حجم پیدا می‌کند، وقتی یخ ذوب می‌شود فضای خالی افزایش یافته به‌طور کامل پر نمی شود و فضای خالی بین ذرات خاک بیشتر شده و چسبندگی خاک را تحت تأثیر قرار داده و آن را کاهش می‌دهد. زمانی که دمای سطحی خاک زیر صفر درجه سانتی‌گراد است جبهه یخزده در خاک پیشروی می‌کند. یخزدگی باعث افزایش فشار یخ و کاهش در فشار آب حفره‌ای می شود. به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ای در جبهه یخزده، آب از لایه‌های زیرین به‌طرف مرزهای یخزده و درون خاک‌های یخزده حرکت می‌کند حتی اگر هیچ راه دسترسی به آب‌های خارجی نداشته باشد (ویلیامز و پرفکت، ۱۹۸۰). آنچه مهم است حفظ ساختمان بهینه خاک‌های کشاورزی برای رشد و نمو محصولات زراعی و باغی است که متأسفانه استفاده بیش از اندازه و ناصحیح به‌کارگیری ماشین‌ها و ادوات کشاورزی باعث تخریب ساختمان خاک‌های کشاورزی مخصوصاً در دهه‌های اخیر شده است. تنش پیش تراکمی به عنوان یکی از ویژگی‌های کلیدی در اهداف عملی تردیدپذیری، مدیریت عملیات مزرعه و ارزیابی سیستم‌های خاک ورزی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. تنش پیش تراکمی برای سالیان زیادی در تحقیقات خاک‌ورزی، تردد در مزرعه، کارآیی خاک و رشد ریشه مورد استفاده قرار گرفته است. مفهوم تنش پیش تراکمی در کشاورزی جهت پایدار نگه‌داشتن ساختمان خاک در برابر نیروهای داخلی و خارجی می تواند مورد استفاده قرار گیرد (طهماسبی و همکاران، ۲۰۰۶). طبق تحقیقات جابرو و همکاران (۲۰۱۴) تراکم خاک در اثر یخبندان و ذوب می‌تواند اصلاح شود. ایشان بیان می‌کنند که در سال‌های اخیر یک مشکل فزاینده‌ای به خاطر فشردگی (تراکم) خاک برای تولید محصولات کشاورزی و کیفیت خاک در کشاورزی مدرن و مکانیزه به وجود آمده است. ادوات کشاورزی نسبت به قبل سنگین تر شده و این امر باعث تراکم بیشتر خاک‌های کشاورزی می شود. بنابراین، بسیاری از کشاورزان باید انرژی زیادی صرف اصلاح فشردگی خاک کنند. فرآیند یخبندان و ذوب خواص فیزیکی و فشردگی و ساختمان خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ایشان از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ اثر دینامیکی فرآیند یخبندان و ذوب را روی فشردگی خاک در یک خاک رسی لومی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار ایشان نشان می‌دهند که فرآیند چرخه‌های یخبندان و ذوب در مدت فصل زمستان باعث اصلاح فشردگی خاک در دامنه ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک می شود. در طی سه سال آزمایش مقاومت به نفوذ در خاکی که متراکم شده بود، به طور معنی‌داری در اثر فرآیند یخبندان و ذوب به اندازه ۷۳، ۶۸ و ۵۹ درصد به ترتیب در اعماق ۰ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری کاهش یافته بود. در همین حال خاک متراکمی که تحت شرایط یخبندان و ذوب قرار نگرفته بود، مقاومت به نفوذ آن در همان اعماق به ترتیب به اندازه ۵۰، ۶۰ و ۴۶ در صد در اثر فعالیت بیولوژیکی خاک و بهم خوردن ساختمان خاک در اثر انقباض و انبساط و تر و خشک شدن کاهش یافته بود. این تحقیق نشان داده است که چرخه‌های فرآیند یخبندان و ذوب می‌تواند باعث اصلاح خاک متراکم شده گردد و باعث بهبود کیفیت فیزیکی خاک شود. ایشان بیان کردند که فرآیند یخبندان و ذوب که در فصل زمستان رخ می‌دهد، موثرترین و اقتصادی‌ترین راه اصلاح خاک متراکم می‌باشد و آن باعث تثبیت ساختمان خاک در طی فرآیند دینامیکی یخبندان و ذوب می‌شود.

هدف از این تحقیق بررسی تغییرات تنش پیش تراکمی و همچنین انرژی تحمیل شده به خاک در حین تراکم روی یک خاک متأثر از فرآیند یخبندان و ذوب می‌باشد.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از خاک زراعی عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری مزرعه آموزشی و پژوهشی عباس‌آباد دانشگاه بوعلی استفاده شد. خاک مورد نظر در ۱۰ سال گذشته کود دهی نشده بود. بعد از تهیه خاک مورد نظر خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و سپس به‌صورت یک‌لایه نازک در سطحی که با پلاستیک پوشیده شده بود پهن شد. بعد از اطمینان از خشک‌شدن کامل خاک با نمونه‌برداری‌های متعدد، خاک خشک شده جمع آوری شده و داخل کیسه‌های پلاستیکی به‌صورت چندلایه قرار داده شد تا از تبادل رطوبتی جلوگیری شود. در هر مرحله از آزمایش به مقدار لازم از خاک خشک برداشته شد. در این تحقیق خاک با دو سطح رطوبتی ۱۰ و ۱۵ درصد رطوبت بر پایه وزن خشک تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت. برای تهیه نمونه‌ها با رطوبت مورد نظر یک سینی فلزی گالوانیزه با لبه‌هایی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر برای جلوگیری از پراکنده شدن خاک مورد آزمایش ساخته شد. بعد از وزن کردن خاک خشک و با در نظر گرفتن در صد رطوبت، میزان آب مورد نیاز برای تهیه نمونه‌ها محا سبه شد. خاک به صورت لایه نازک در سطح سینی پخش شد و آب با آب‌پاش دستی بر روی خاک اسپری شد و با خاک کاملاً مخلوط گردید. بعد از پایان کار برای اطمینان از درستی کار نمونه‌های مرطوب شده کاملاً از سطح سینی جمع‌آوری شده و وزن شد. بعد از حصول اطمینان از درستی کار، نمونه‌ها داخل پاکت‌های پلاستیکی قرار داده شدند و درب پاکت‌ها کاملاً بسته شد. نمونه‌ها در داخل چندلایه پلاستیک دیگر قرار داده شدند تا رطوبت نمونه‌ها حفظ شود. نمونه‌ها برای تعادل رطوبتی به مدت ۲۴ ساعت داخل پاکت‌ها پلاستیکی می‌ماندند و سپس برای مراحل بعدی آماده می‌شدند. با توجه به رابطه ۱، با داشتن چگالی (ρ)، و حجم نمونه (v)، وزن هر نمونه محاسبه گردید. سپس خاک مورد نیاز وزن شده و به سه قسمت مساوی تقسیم شد. خاک در هر سه لایه داخل ظرف آزمایش ریخته شد و سپس سه سطح چگالی خاک (۱/۱۵، ۱/۲۶۵ و ۱/۳۹) گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد.

$$\rho = \frac{m}{v} \qquad (۱)$$

جدول ۱ مشخصات خاک مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات خاک مورد آزمایش

بافت خاک	**لوم رسی شنی**
درصد ماسه S	**۴۶/۹۲**
درصد سیلت SI	**۲۷/۲۸**
درصد رس C	**۲۵/۸**

برای ایجاد شرایط یخبندان نمونه‌ها از یک دستگاه فریزر با قابلیت کاهش دما تا ۲۴- درجه سانتی‌گراد استفاده شد. فریزر مورد نظر به یک ترموستات دیجیتالی مجهز بود که قادر بود دما را تا ۲۵- درجه سانتی‌گراد با دقت یک درجه تنظیم کند و طوری تنظیم شده بود که دما را در دامنه ۱۰- تا ۱۱- درجه سانتی‌گراد ثابت نگه می‌داشت. برای اندازه‌گیری دما در داخل فریزر از ۵ عدد ترمومتر دیجیتالی استفاده شد. در این تحقیق نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت تأثیر فرآیند یخبندان قرارگرفته و سپس از فریزر خارج شد تا خاک یخزده ذوب شود. این فرآیند هفت مرتبه تکرار شد. سنسور کنترل دما نزدیک به سطح نمونه در داخل فریزر قرار داده شد تا تنظیم دما بر اساس دمای بالای نمونه داخل فریزر انجام گیرد.در این تحقیق تنش پیش تراکمی و میزان انرژی مصرفی در حین تراکم خاک اندازه‌گیری شد.

شکل ۱- ظرف آزمایش و سامانه بارگذاری در آزمون نشست صفحه‌ای

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

در تحقیق حاضر برای محاسبه پارامترهای مورد نظر از آزمون نشست صفحه‌ای (PST) استفاده شد. از آنجایی‌که در این آزمون خاک دست نخورده باقی می‌ماند و رفتار خاک طبیعی مورد بررسی قرار می‌گیرد و هم به صورت آزمایشگاهی و هم در مزرعه قابل اجرا است، از این آزمون در بررسی خاک تحت تاثیر فرآیند یخبندان و ذوب استفاده شد. در آزمون نشست صفحه‌ای توسط یک صفحه با مساحت معین، خاک با نرخ معینی بارگذاری می‌شود. در تحقیق حاضر پس از اعمال پیش‌بار از یک صفحه بارگذاری به قطر ۵۰ میلی‌متر استفاده شد که نرخ بارگذاری برابر یک میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد.

برای محاسبه انرژی مصرف شده حین تراکم، سطح زیر نمودار بار- تغییر مکان در نرم‌افزار Excel محاسبه شد. و برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS استفاده گردید. برای محاسبه تنش پیش- تراکمی مطابق شکل ۲ از روش الکساندرو و ارال استفاده گردید (آلکساندرو و ایرال، ۱۹۹۵). در این روش مطابق شکل ۲، بر منحنی نشست-تنش دو مجانب رسم می‌کنیم و محل تقاطع این دو مجانب را پیدا کرده و از آن خطی افقی رسم می‌کنیم تا با محور عمودی (محور تنش) برخورد کند. محل برخورد معادل تنش پیش-تراکمی می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

جدول ۲ نتیجه تجزیه واریانس اثر فاکتورهای متغیر (دما، دانسیته و رطوبت) بر تنش پیش- تراکمی خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول تجزیه واریانس مشخص است، اثر هر سه فاکتور بر تنش پیش تراکمی در سطح ۱٪ معنی‌دار است.

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در این تحقیق اثر دما بر تنش پیش تراکمی بود که اثر آن در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. از آنجایی‌که در دمای ۱۰- درجه یخبندان رخ می‌داد، این فرآیند خواص فیزیکی و مکانیکی خاک را تحت تأثیر قرار داده و ساختمان خاک و برخی خواص مکانیکی آن را نیز تغییر داده و متأثر از آن تنش پیش تراکمی خاک نیز تغییر پیدا کرد. این فرآیند باعث کاهش تنش پیش-تراکمی گردید.

جدول ۲- تجزیه واریانس مطالعه اثر سه فاکتور دما، رطوبت و دانسیته بر تنش پیش-تراکمی خاک

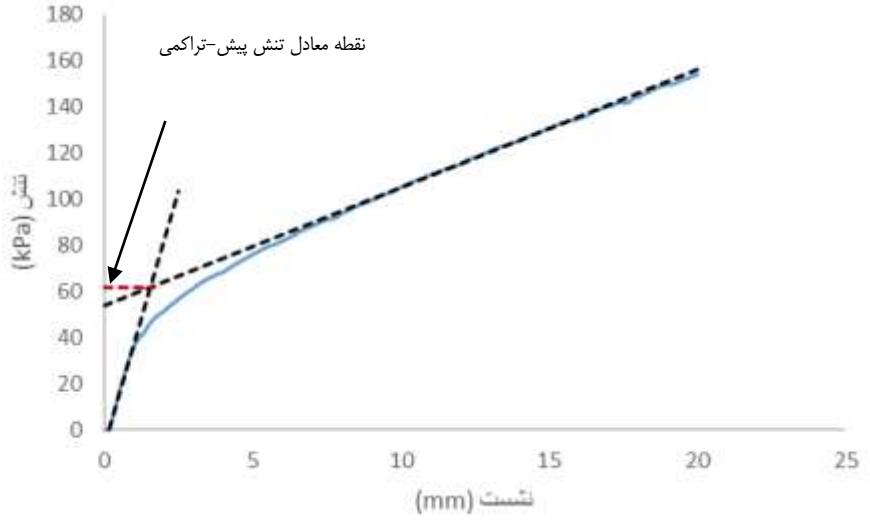
منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
دما	۱	۲۱۳۶۵	۲۲/۴۹**
رطوبت	۱	۶۹۶۰۸	۷۳/۳**
دانسیته	۲	۱۵۸۱۶۲	۸۳/۲۶**
دما*رطوبت	۱	۴۷۳۸	۴/۹۹*
دما*دانسیته	۲	۵۶۸۸۹/۴	۲۹/۹**
رطوبت*دانسیته	۲	۹۲۰۷/۴	۴۸/۴**
دما*رطوبت*دانسیته	۲	۱۶۸۵۰/۴	۸/۸۷*

**: در سطح ۱ درصد معنی‌دار *: در سطح ۵ درصد معنی‌دار

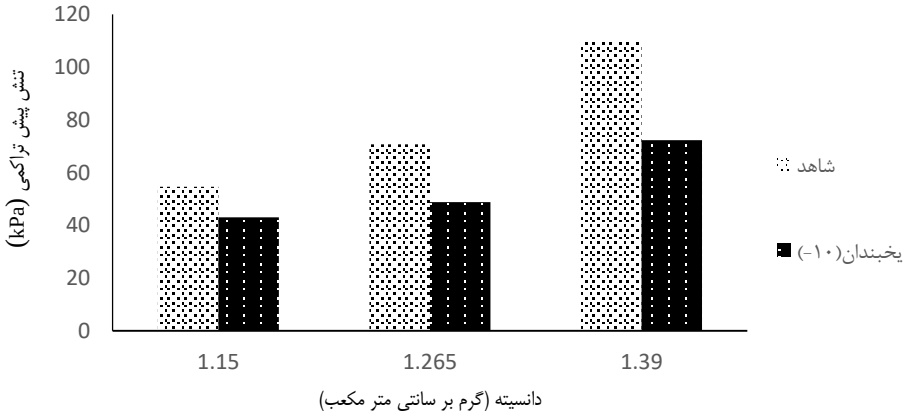
ساختمان خاک به‌شدت تحت تأثر فرآیند یخبندان و ذوب تغییر می‌کند. خواص مکانیکی و ساختمان میکروسکوپی خاک تحت تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب نسبت به نمونه یخ نزده متفاوت است (کویی و همکاران، ۲۰۱۴). ساختمان داخلی خاک و نیروی اتصال ذرات خاک در طی فرآیند یخبندان و ذوب تخریب می‌شود (گراهام و آیو، ۱۹۸۵؛ کونراد، ۱۹۸۹). فرآیند یخبندان و ذوب دارای اثر زیادی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مانند، هدایت هیدرولیکی، محتوای رطوبتی خاک یخ نزده، استحکام، تراکم‌پذیری و ظرفیت باربری خاک دارد (قزوینی و روستایی، ۲۰۱۳).

طبق تحقیقات آورا (۱۹۸۳) در یک خاک رسی متراکم شده به خاطر عبور و مرور ماشین‌ها با بارمحوری ۳ تن، در فصل بهار با شخم‌زنی و فرآیند یخبندان زمستانه، تراکم خاک اصلاح شده و خاک نرم می‌گردد. بنابراین، فرآیند یخبندان و ذوب در مناطق سردسیر باعث نرم‌تر شدن خاک می‌شود. این فرآیند با کاهش تراکم خاک، شرایط مناسبی برای خاک‌های کشاورزی ایجاد می‌کند ولی خاک نرم شده مستعد تراکم است و طبق نتایج حاصل از این پژوهش ظرفیت باربری خاک یا تنش در آستانه تراکم خاک تحت تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب کاهش می‌یابد. بنابراین، جهت حفظ اثرات مفید یخبندان و ذوب بر روی خاک زراعی از اعمال بار محوری که باعث ایجاد تنش بیش از تنش پیش- تراکمی شود باید اجتناب نمود. لذا قبل از به‌کارگیری ادوات و ماشین‌های کشاورزی در زمین زراعی، شرایط آن باید مد نظر قرار گیرد.

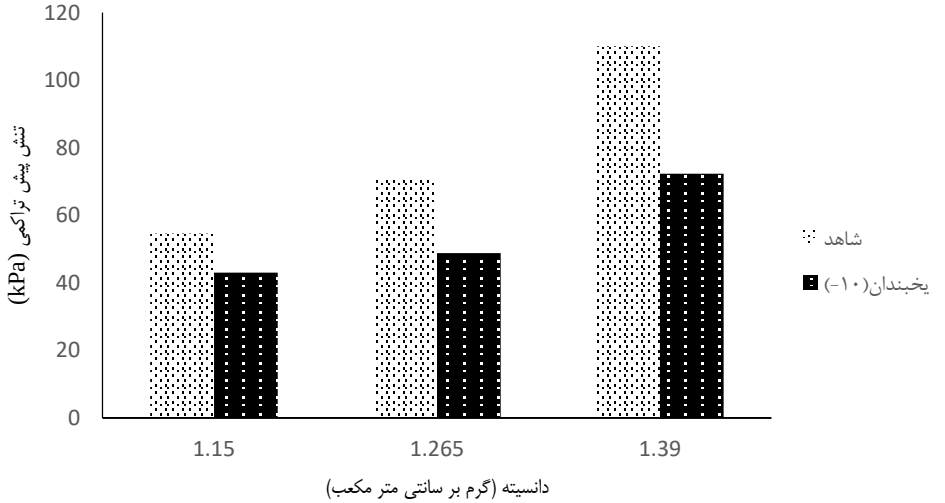
یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران



شکل ۲- محاسبه تنش پیش-تراکمی به روش الکساندرو و ارل



شکل ۳- نمودار تنش پیش‌تراکمی در رطوبت ۱۰ درصد



شکل ۴- نمودار تنش پیش‌تراکمی در رطوبت ۱۵ درصد

پارامتر دیگری که بر تنش در آستانه تراکم خاک مؤثر بود و در سطح ۱٪ اثر آن معنی‌دار شد، رطوبت خاک بود. با افزایش رطوبت در دامنه تغییرات این تحقیق، تنش پیش-تراکمی کاهش یافت. به‌عبارت‌دیگر با افزایش رطوبت خاک مورد مطالعه مستعد تراکم می‌شد. رابطه قوی بین تنش پیش‌تراکمی و رطوبت بیانگر نقش غالب چسبندگی در مقایسه با اصطکاک داخلی در مقاومت خاک می‌باشد (مصدقی، ۲۰۰۳). این فرآیند در خاک‌های چسبنده بسیار مشهود است؛ زیرا چسبندگی خاک متاثر از رطوبت آن می‌باشد. طبق گزارش آلاکوکو (۱۹۹۶) انجام عملیات ماشینی در شرایط مرطوب خطر تراکم خاک را افزایش می‌دهد. یک بار محوری ناشی از عبور ماشین‌ها در مزرعه به میزان ۹ تن در شرایط مرطوب می‌تواند خاک را تا عمق نیم متری متراکم کند.

اثر برهم‌کنش دما و رطوبت در این پژوهش در سطح احتمال ۵٪ بر تنش پیش‌تراکمی اثرگذار بود. هر چه رطوبت در دامنه تحقیق حاضر بیشتر بود، میزان کاهش تنش پیش‌تراکمی با تغییرات دما نسبت به تیمار شاهد بیشتر شد. از آنجایی‌که در تحقیق حاضر محیط محدود بود و رطوبت از خود نمونه جهت تشکیل کریستال‌های یخ تأمین می‌شد، با وجود رطوبت بیشتر در نمونه با داشتن شرایط مناسب، کریستال‌های یخ بزرگ‌تر شده و با ایجاد تخلخل بیشتر و کاهش نیروی چسبندگی بین اجزاء خاک و نرم کردن خاک از تراکم خاک کاسته ولی تراکم‌پذیری خاک را افزایش می‌دهد. به همین دلیل با افزایش رطوبت و یخبندان، تراکم‌پذیری خاک بیشتر شده و ظرفیت باربری خاک (تنش پیش‌تراکمی) کاهش یافت. بنابراین، در صورت کاهش دما به زیر نقطه انجماد و وجود رطوبت کافی، این فرآیند باعث نرم و نفوذپذیر شدن خاک شده و شرایط را برای سر برآوردن جوانه‌ها از خاک فراهم آورده ولی شرایط برای تردد ماشین‌ها و ادوات کشاورزی که بار محوری زیادی به خاک اعمال می‌کنند، مهیا نیست.

پارامتر دیگر مورد مطالعه در این تحقیق دانسیته نمونه‌ها بود. با افزایش چگالی تنش پیش‌تراکمی افزایش یافت. مصدقی (۲۰۰۳) بیان می‌کند که روند تغییرات تنش پیش-تراکمی با چگالی افزایشی است. کاناراچه و همکاران (۲۰۰۰) نشان دادند که در خاک‌های زیرشکن شده تنش پیش‌تراکمی با افزایش چگالی افزایش می‌یابد. آلکساندرو و ایرال (۱۹۹۵) با استفاده از آزمون نشست صفحه‌ای در تعیین تنش پیش‌تراکمی به این نتیجه رسیدند که تنش پیش‌تراکمی یک خاک لومی شنی با افزایش چگالی و کاهش درصد رطوبت، افزایش می‌یابد.اثر دما و دانسیته شاخص دیگری بود که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که این اثر بر روی تنش پیش‌تراکمی در سطح ۱٪ معنی‌دار است؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار مربوط به دانسیته ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دمای ۱۰- درجه و بیشترین مقدار مربوط به دمای بالای نقطه انجماد (خاک منجمد نشده) و دانسیته ۱/۳۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب بود. بنابراین، در خاک‌های متأثر از فرآیند یخبندان و ذوب که دانسیته آنها پایین است این فرآیند باعث نرم‌تر شدن خاک شده و خاک را مستعد تراکم می‌کند که خاک‌ورزی در این شرایط توصیه نمی‌شود.اثر برهم کنش رطوبت و دانسیته نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند این اثر در سطح ۱٪ معنی‌دار است؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار مربوط به رطوبت ۱۰٪ و دانسیته ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و بیشترین مقدار مربوط به رطوبت ۱۰٪ و دانسیته ۱/۳۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب بود. اثر برهم‌کنش سه پارامتر دما*رطوبت*دانسیته بر روی تنش پیش‌تراکمی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. در دامنه تغییرات این تحقیق با افزایش رطوبت و دانسیته، تنش پیش‌تراکمی تحت تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب کاهش پیدا می‌کرد. در زمین‌های زراعی تنش پیش‌تراکمی از دو جهت مورد اهمیت است. اول در مورد اعمال تنش بر خاک ناشی از عبور و مرور تراکتورها و ادوات است که در صورت کنترل آن در حدی کمتر از تنش پیش‌تراکمی منجر به افزایش تراکم نخواهد شد. در این صورت خاک با داشتن تنش پیش‌تراکمی بالاتر برای عبور و مرور ادوات بهتر است. ولی از دیدگاه رشد و نمو گیاهان در خاک و گسترش ریشه گیاهان، خاک نفوذپذیر که مقاومت کمتری در برابر رشد و گسترش ریشه‌ها و سر برآوردن جوانه‌ها از خاک دارد، مناسب‌تر است. هرچند خاک خیلی نرم با چگالی پایین برای جوانه‌زنی و رشد گیاهان هم مناسب نیست. بون (۱۹۸۵) معتقد است که برای بیشینه عملکرد هر محصول یک سطح تراکم بهینه برای خاک وجود دارد. وات و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که تنش پیش‌تراکمی به‌عنوان شاخص بحرانی برای تنفس خاک نیز قابل استفاده است، به‌طوری‌که اعمال تنش‌های بیش از حد تنش پیش‌تراکمی، سبب کاهش تنفس خاک می‌شود. کاهش منافذ پر از هوا نیز باعث کاهش قابل ملاحظه انتشار گاز و در نتیجه تنفس خاک است. رومکنز و میلر (۱۹۷۱) بیان کردند که تنش پیش‌تراکمی به‌عنوان شاخص مناسبی برای تخمین تراکم و رشد ریشه می‌باشد که با افزایش تنش پیش‌تراکمی رشد و تراکم ریشه کاهش می‌یابد. بنابر آنچه گفته شد، فرآیند یخبندان و ذوب می‌تواند علاوه بر کاهش تراکم خاک، محیط مناسبی برای رشد و نمو گیاهان فراهم آورد. بنابراین، شناخت اثرات فرآیند یخبندان و ذوب می‌تواند در مدیریت ترافیک ادوات و ماشین‌ها در مزرعه و همچنین مدیریت زراعی مزرعه، مفید باشد.

پارامتر دیگر مورد مطالعه در این تحقیق، میزان انرژی مصرف‌شده در حین تراکم خاک بود. نتایج تیمارهای تحت تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب در مقایسه با نمونه‌های شاهد (نمونه‌های بدون تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب، یک سطح از سطوح تأثیرات دما بر نمونه‌های خاک مورد آزمایش)، تفاوت معنی‌داری داشت. فرآیند یخبندان و ذوب باعث کاهش انرژی مورد نیاز جهت متراکم کردن خاک می‌شد. جدول ۳ نتیجه تجزیه واریانس اثر فاکتورهای متغیر (دما، دانسیته و رطوبت) بر میزان انرژی مصرف‌شده در حین تراکم خاک را نشان می‌دهد.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

جدول ۳- تجزیه واریانس مطالعه اثر سه فاکتور دما، رطوبت و دانسیته بر میزان انرژی مصرف‌شده در حین تراکم خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
دما	۱	۱۴۲۵۶۳۶	۲۷/۴۳**
رطوبت	۱	۱۴۷۸۶۵۸۸	۲۸۴/۵۵**
دانسیته	۲	۷۹۱۴۸	۱۶۴/۶۲**
دما*رطوبت	۱	۱۷۱۰۸۲۶۲	۱/۵۲ns
دما*دانسیته	۲	۱۵۰۱۱۷۷	۱۴/۴۴**
رطوبت*دانسیته	۲	۱۰۳۳۴۰۱۱	۹۹/۴۳**
دما*رطوبت*دانسیته	۲	۱۳۹۴۸۷۴	۱۳/۴**

**: در سطح ۱ درصد معنی‌دار ns: غیر معنی‌دار

در هنگام بارگذاری محوری خاک، نشست خاک صورت می‌گیرد. اگر این مقدار تغییر در خاک در ناحیه الاستیک بوده و به‌عبارت دیگر تنش ایجادشده در خاک کمتر از تنش پیش‌تراکمی باشد، قسمت زیادی از تغییر شکل برمی‌گردد. در صورتی‌که نشست خاک زیاد باشد طوری‌که تغییر مکان ماندگار در خاک ایجاد شود، کل انرژی صرف شده در حین بارگذاری برنمی‌گردد. در تحقیق حاضر کل انرژی تحمیل شده به خاک در مرحله بارگذاری محاسبه شد. یااو و همکاران (۲۰۰۹) گزارش دادند که وقتی خاک تحت بار قرار می‌گیرد، تنش محوری باعث کار پلاستیک در خاک می‌شود. مقداری از این کار پلاستیک به خاطر اصطکاک بین ذرات خاک از بین می‌رود و قسمتی دیگر به‌صورت انرژی آزاد در خاک ذخیره می‌شود. وقتی میکرو ساختمان خاک تغییر می‌کند، انرژی یا آزاد می‌شود یا تجمع می‌یابد. از نقطه نظر میکرو ساختاری خاک، کار انرژی آزاد پلاستیک در بین ذرات ذخیره می‌شود. وقتی ذرات خاک دوباره آرایش می‌یابند، مطابق تغییرات آن انرژی ذخیره شده در خاک نیز تغییر می‌کند. بنابراین، انرژی ذخیره شده تابعی از خواص فیزیکی و مکانیکی خاک است (کین و همکاران، ۲۰۰۵). یاوو و همکاران (۲۰۰۹) بیان می‌کنند که فرآیند یخبندان و ذوب فرآیندی فصلی است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای ساختمان خاک و خواص فیزیکی خاک را تغییر می‌دهد. با تغییر در خواص فیزیکی، خواص مکانیکی خاک نیز تغییر می‌کند. این فرآیند باعث کاهش پیوند اجزاء خاک شده و خاک را سست و نفوذپذیر می‌کند. کی و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند که پارامترهای مکانیکی مانند فشار پیش‌تحکیم و چسبندگی خاک، بعد از یخبندان و ذوب تغییر کرده و کاهش پیدا می‌کند. بر اساس نتایج پژوهش کولینز (۲۰۰۵) خواص فیزیکی و مکانیکی خاک به‌تبع تغییر در اتصال بین ذرات خاک و ترکیب ذرات خاک به دلیل اثر فرآیند یخبندان و ذوب تغییر می‌کند. بنابراین، انرژی آزاد ذخیره‌شده در خاک نیز با تغییر در این پارامترها تغییر پیدا کرده و با کاهش آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. یاوو و همکاران (۲۰۰۹) بیان می‌کنند که وقتی چسبندگی خاک افزایش می‌یابد، نیروی بین اتصال ذرات خاک افزایش‌یافته بنابراین، انرژی پلاستیک بیشتری در خاک ذخیره می‌شود. و هنگامی‌که اصطکاک داخلی بین ذرات خاک افزایش یابد، انرژی بیشتری در حین کار پلاستیک هدر می‌رود. همچنین ایشان در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که انرژی ذخیره شده در خاک مستقیم با چگالی خاک مرتبط است. هر اندازه وزن واحد خشک خاک بیشتر باشد، میزان انرژی آزاد ذخیره‌شده در خاک بیشتر است. ایشان دریافتند که نمونه‌های خاک با چگالی بیشتر وقتی تحت تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب قرار می‌گیرند، خاک ضعیف‌تر شده و این فرآیند باعث آزاد شدن انرژی می‌شود. همچنین آزمایش‌های ایشان نشان دادند که انرژی ذخیره شده در خاک مستقیماً با چسبندگی خاک مرتبط است و رابطه معکوس با زاویه اصطکاک خاک دارد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی اثر فرآیند یخبندان و ذوب تنش پیش‌تراکمی و انرژی مورد نیاز جهت تراکم خاک مورد مطالعه در دو سطح رطوبتی و سه سطح دانسیته بود. در این پژوهش مشخص گردید فرآیند یخبندان و ذوب اثر معنی‌داری بر روی تنش پیش‌تراکمی و انرژی مورد نیاز جهت تراکم خاک دارد. این فرآیند باعث کاهش تنش پیش‌تراکمی در سطوح مختلف چگالی در دامنه مورد مطالعه شد. همچنین این فرآیند باعث کاهش انرژی مورد نیاز جهت تراکم خاک شد. به‌عبارت دیگر خاک تحت تأثیر فرآیند یخبندان و ذوب نفوذ پذیرتر شده و مستعد تراکم می‌شد. از آنجایی‌که بعد از گذشت فصل سرما شرایط برای رشد و نمو گیاهان فراهم می‌شود، اثر یخبندان که موجب نرم‌تر و نفوذپذیری بیشتر خاک می‌شود، این فرآیند بر رشد ریشه‌ها، اثری مثبت و مناسب است. در این حالت گیاهان برای گسترش ریشه‌ها با مقاومت کمتری روبرو می‌شوند. از بعد دیگر، اعمال هر بار محوری بر خاک تحت تأثیر این فرآیند بیش از بار مجاز باعث متراکم کردن خاک شده و اثرات مثبت فرآیند یخبندان و ذوب را کاهش می‌دهد. لحاظ کردن اثرات یخبندان و ذوب در مدیریت تردد ماشین‌ها و ادوات در مزرعه می‌تواند امری مفید باشد. انجام عملیات خاک‌ورزی قبل از آغاز

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

فصل سرد با در نظر گرفتن اثر یخبندان و ذوب بر روی خاک و اجتناب از عبور و مرور غیرضروری در مزرعه علاوه بر کاهش توان مورد نیاز در مزرعه، از تخریب ساختمان خاک در اثر تراکم خاک جلوگیری کرده و اثرات یخبندان و ذوب را کاهش نمی‌دهد.

منابع مورد استفاده

Alakukku, L. 1996. **Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils.** Soil and Tillage Research. 37: 211-222.

Alexandrou, A. and R. Earl. 1995. **In situ determination of the pre-compaction stress of a soil.** Journal of Agricultural Engineering Research. 61: 67-71.

Andersland, O.B. and B. Ladanyi. 2004. **Frozen ground engineering.** John Wiley & Sons.

Aragón, A. Garcıa, M. Filgueira, R. and Y.A. Pachepsky. 2000. **Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content.** Soil and Tillage Research. 56: 197-204.

Aura, E. 1983. **Soil compaction by the tractor in spring and its effect on soil porosity [Finland].** Journal of the scientific agricultural society of Finland.

Canarache, A. Horn, R. and I. Colibas. 2000. **Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania.** Soil and Tillage Research. 56: 185-196.

Silva, A.P. and T. Keller. 2008. **Determination of precompression** Cavalieri, K.M.V. Arvidsson, J. da **stress from uniaxial compression tests.** Soil and Tillage Research. 98: 17-26.

Collins, I.F. 2005. **The concept of stored plastic work or frozen elastic energy in soil mechanics.** Geotechnique. 55: 373-382.

P. and W.H. Yang. 2014. **Mechanical properties of a silty clay subjected to freezing–**.Cui, Z. D. He, P **thawing.** Cold Regions Science and Technology. 98: 26-34.

Culley, J. 1993. **Density and compressibility.** Soil sampling and methods of analysis. 1: 529-539.

Dash, J. G. 1989. **Thermonuclear pressure in surface melting.** Motivation for frost heave science. 246: 1591-1593.

Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of Eigenbrod, K. 1996. **soft fine-gained soils.** Canadian Geotechnical Journal. 33: 529-537.

Ghazviani, M. and M. Roustaei. 2013. **Freeze–thaw performance of clayey soil reinforced with** Cold Regions Science and Technology. 89: 22-29 **geotextile layer.**

Graham, J. and V. Au. 1985. **Effects of freeze-thaw and softening on natural clay at low stresses.** Canadian Geotechnical Journal. 22: 69-78.

A review of the nature, :Hamza, M. and W. Anderson. 2005. **Soil compaction in cropping systems causes and possible solutions.** Soil and tillage research. 82: 121-145.

Jabro, J.D., Iversen, W.M., Evans, R.G., Allen, B.L. & Stevens, W.B., (2014). **Repeated Freeze-Thaw Cycle Effects on Soil Compaction in a Clay Loam in Northeastern Montana.** *Soil Science Society of America Journal* 78, 737.

Keller, T. and J. Arvidsson. 2007. **Compressive properties of some Swedish and Danish structured** journal of soil science. 58: 1373- **agricultural soils measured in uniaxial compression tests.** European 1381.

Konrad, J. M. 1989. **Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts.** Cold Regions Science and Technology. 16: 291-303.

Mosaddeghi, M. R. 2003. **Pre-compaction stress and relationship with the physical and mechanical properties of selected soil in isfahan.** College of agriculture. Isfahan univessity of technology, Isfahan, p. 245.

Mosaddeghi, M. R. Hemmat, A. Hajabbasi, M.A. Vafaeian, M. and A. Alexandrou. 2006. **Plate sinkage versus confined compression tests for in situ soil compressibility studies.** Biosystems Engineering. 93: 325-334.

Oldeman, L. Hakkeling, R. and W.Sombroek, 1991. **World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note,** 2nd. Rev. ISRIC [etc.].

Qi, J. Ma, W. and C. Song. 2008. **Influence of freeze–thaw on engineering properties of a silty soil.** Cold .regions science and technology. 53: 397-404

Qi, J. Zhang, J. Y. Zhu. 2003. **Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics** .Journal of Rock Mechanics and Engineering. 22: 2690-2694 **significance.** Chinese

QIN, L. M. CHI, S.C. and G. LIN. 2005. **A Model of soil constitutive relation based on energy dissipation its parameters determination.** Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. S2.
Raghavan, G. Alvo, P. and E.McKyes, 1990. **Soil compaction in agriculture: a view toward managing .the problem.** Advances in soil science. Springer, pp. 1-36

root size and frequency from one-dimensional Römkens, M. and R. Miller. 1971. **Predicting .consolidation data—a mathematical model.** Plant and soil. 35: 237-248

Rücknagel, J. Brandhuber, R. Hofmann, B. Lebert, M. Marschall, K. Paul, R. Stock, O. and O. Christen. 2010. **Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande .method and derived mathematical models.** Soil and Tillage Research. 106: 165-170

Schafer, R. Johnson, C. Koolen, A. Gupta, S. and R. Horn, 1992. **Future research needs in soil .compaction.** Transactions of the ASAE. 35: 1761-1770

Shainberg, I. Keren, R. and H. Frenkel. 1982. **Response of sodic soils to gypsum and calcium chloride .application.** Soil Science Society of America Journal. 46: 113-117

Soane, B.D. 1985. **Traction and transport systems as related to cropping systems.** Journal of .Terramechanics. 22: 184

Tahmasebi, M. Hemmat, A. Vafaiee, M. and M.R. Mosaddeghi. 2006. **Application of Stress tests in determining the pre-compression stress of a sandy-loam soil and its relationship with shear strength.** Seventh International Congress on Civil Engineering.
Wang, D.-y. Ma, W. Niu, Y.-h. Chang, X.-x. and Z. Wen. 2007. **Effects of cyclic freezing and thawing on .mechanical properties of Qinghai–Tibet clay.** Cold regions science and technology. 48: 34-43

Watts, C. Hallett, P. and A. Dexter. 1999. **Effects of mechanical stresses and strains on soil respiration.** Effect of Mineral-Organic-Microorganism Interactions on Soil and Freshwater Environments. Springer, pp. .305-316

Williams, P.J. and E. Perfect, 1980. **Investigation of thermally actuated water migration in frozen soils.** .Energy, Mines and Resources Canada, Earth Physics Branch

Yao, X. Qi, J. and W. Ma. 2009. **Influence of freeze–thaw on the stored free energy in soils.** Cold Regions Science and Technology 56.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران