

## تأثیر چرخه‌های تروخشک شدن بر برآورد تنش در آستانه‌ی تراکم یک خاک ریزبافت

مریم صالحیان دستجردی و عباس همت<sup>\*۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۱۶)

### چکیده

خاک‌های زراعی، در روش آبیاری غرقابی مرتباً تحت تأثیر فرآیندهای تروخشک شدن قرار می‌گیرند. به‌همین‌منظور، اثر این فرآیند بر ظرفیت باربری (تنش پیش-تراکمی؛  $\sigma_{pc}$ ) یک خاک رس سیلنتی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، نمونه‌های بزرگ خاک تهیه و برخی از آنها تحت تأثیر ۵ چرخه تروخشک شدن قرار گرفت. سپس نمونه‌ها با یا بدون فرآیند تروخشک شدن تحت سه بار (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) و در دو سطح رطوبتی معین (۰/۹ و ۱/۱ حد خمیری (PL)) متراکم گردید. بارگذاری مجدد با آزمایش نشست صفحه‌ای در مرکز نمونه‌ها انجام شد. از اطراف محل این آزمایش، نمونه‌ای برای انجام آزمایش فشردگی محصور تهیه گردید. نتایج نشان داد که برای نمونه‌های بازسازی‌شده و بدون فرآیند تروخشک شدن، مقدار  $\sigma_{pc}$  برآورد شده با آزمایش نشست صفحه‌ای، اختلاف معنی‌داری با بار اولیه وارد شده به نمونه نداشت. بنابراین، از این روش می‌توان برای تعیین ظرفیت باربری خاک‌های خاک‌ورزی شده استفاده نمود. ولی فرآیند تروخشک شدن به‌طور معنی‌داری موجب بیش-تخمینی  $\sigma_{pc}$  در هر سطح رطوبتی، گردید. بنابراین، فشردگی‌پذیری خاک تنها به رطوبت واقعی خاک بستگی ندارد، بلکه به تاریخچه‌ی قبلی تغییرات رطوبت خاک (به‌طور مثال، فرآیندهای تروخشک شدن) نیز وابسته است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری غرقابی، تروخشک شدن خاک، تنش پیش-تراکمی

۱. گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

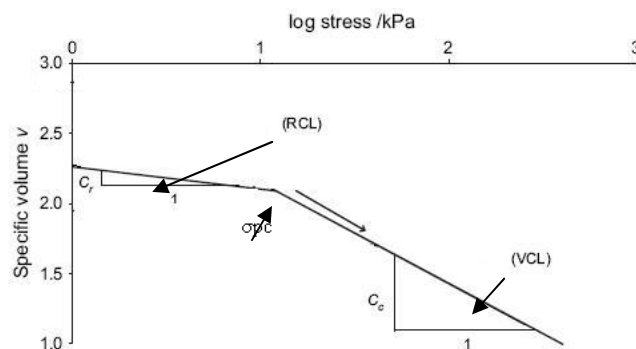
\* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [ahemmat@cc.iut.ac.ir](mailto:ahemmat@cc.iut.ac.ir)

## مقدمه

تراکم خاک به فرآیند کاهش حجم خاک در اثر خروج هوای منفذی گفته می‌شود. از عوامل تأثیرگذار بر تراکم خاک‌ها، می‌توان بافت، ساختمان، مقدار رطوبت، درصد آهک، مقدار ماده آلی خاک را نام برد (۲۰). مقدار آب موجود در خاک به عنوان یک عامل تعیین کننده در تراکم خاک است (۱۶ و ۱۷). آب خاک معمولاً در فرآیند تراکم، در فواصل بزرگ جابه‌جا نمی‌شود، بلکه پتانسیل آن تغییر می‌کند. حجم ذرات جامد نیز تغییر نمی‌کند، اگرچه آنها آرایش جدیدی انتخاب می‌کنند. کولن معتقد است که در خاک‌های کشاورزی، علاوه بر نیروهای خارجی وارده به خاک، به تراکم خاک در اثر فرآیندهای داخلی (حاصل از نیروهای مکش آب خاک) نیز باید توجه شود (۱۲). تروخشک شدن با ایجاد تنش در خاک، ساختمان فیزیکی آن را تغییر می‌دهد. کلر و همکاران نشان دادند که در طول مرطوب شدن خاک، مقاومت آن کاهش می‌یابد و ساختمان به طور آهسته عوض می‌شود؛ هم‌چنین خاکدانه‌ها بدون مشاهده‌ی تغییر در سطح رطوبت خاک، به هم می‌پیوندند (۱۰). هنگامی که خاک‌های غیراشباع تحت تنش‌های داخلی و خارجی قرار می‌گیرند، در اثر جوش خوردن خاکدانه‌ها و تبدیل آنها به واحدهای بزرگ‌تر، منافذ خاک کاهش می‌یابد (۶). مشاهدات پژوهشگران نشان داده است، زمانی که خاکدانه‌ها تحت نیروهای فشاری خارجی قرار می‌گیرند، کاهش در حجم خاک، عمدتاً در اثر تغییر شکل خمیری در محل تماس خاکدانه‌ها می‌باشد. زمانی که تنش برشی اعمال شده بیشتر از مقاومت برشی خاک شود، تغییر شکل رخ می‌دهد. صاف شدن رویه‌های تماس خاکدانه‌ها، تنش‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و بنابراین برای یک سطح تنش داده شده، از تغییر شکل نامحدود جلوگیری می‌شود (۸). تغییر شکل خمیری در نقاط تماس خاکدانه‌ها تحت چرخه‌های تروخشک شدن نیز رخ می‌دهد. خاکدانه‌ها با به هم پیوستن محل تماسشان، واحدهای بزرگی را تشکیل می‌دهند. در این حالت قسمتی از منافذ بین خاکدانه‌ها حفظ شده و فقط اندازه‌ی آنها کاهش می‌یابد (۶).

تعیین تراکم پذیری خاک، نیازمند شاخصی است که مقدار تغییر در ویژگی‌های خاک را نشان دهد. در این رابطه، بررسی نمودار لگاریتم تنش و یکی از پارامترهای مربوط به حالت تراکمی خاک از جمله تخلخل ( $e$ )، چگالی ظاهری ( $BD$ )، کرنش ( $\epsilon$ ) و حجم ویژه ( $v=1+e$ ) خاک، دانسته‌های مفیدی در اختیار ما قرار می‌دهند (۱۰). با رسم یکی از پارامترهای مربوط به حالت تراکمی خاک در برابر لگاریتم تنش عمودی، رفتار خاک به دو ناحیه‌ی مجزا تقسیم می‌شود: ۱) ناحیه الاستیک در تنش‌های پایین که خط فشردگی مجدد یا خط تورم ( $RCL$ ) نامیده می‌شود و ۲) ناحیه خطی در تنش‌های بالاتر که خط فشردگی بکر ( $VCL$ ) نام دارد. محل تقاطع این دو خط، تنش پیش-تراکمی ( $\sigma_{pc}$ ) را نشان می‌دهد (شکل ۱). هرگاه خاک تحت تنش‌های کوچک‌تر از  $\sigma_{pc}$  قرار گیرد، تغییر شکل خاک ناچیز می‌باشد، ولی در تنش‌های بزرگ‌تر، تغییر شکل خاک ماندگار خواهد بود (۵). بنابراین، هدف اصلی از تعیین  $\sigma_{pc}$  تعیین ظرفیت باربری خاک ( $Load support capacity$ ) یا تنش در آستانه‌ی تراکم می‌باشد، تا با محدود نمودن بارگذاری (در اثر تردد) به مقادیر کمتر از  $\sigma_{pc}$  خطر تراکم (یا تغییر شکل ماندگار در خاک) به حداقل برسد (۳).

امروزه روش‌های آزمایشگاهی متعددی برای تعیین پارامترهای تراکمی خاک‌های کشاورزی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، آزمایش فشردگی یک‌بعدی (ادومتر) است. در این آزمایش، بارهای ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال، هر یک به مدت ۵ تا ۳۰ دقیقه به طور مرحله‌ای بر نمونه‌های استوانه‌ای خاک وارد می‌شود و در پایان هر فاصله‌ی زمانی، تغییر شکل عمودی خاک قرائت می‌گردد. علاوه بر این روش، از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای ( $PST$ ) و فشردگی محصور ( $CCT$ ) نیز استفاده می‌شود (۹ و ۱۰). در این دو روش علاوه بر این‌که به زمان کمی برای انجام آنها نیاز است، به دو روش آزمایشگاهی و صحرایی (۱۵) نیز قابل اجرا هستند. در آزمایش فشردگی محصور، خاک در درون یک سیلندر صلب توسط یک پیستون متحرک به سمت پایین با یک نرخ ثابت متراکم می‌شوند و تنش وارده به پیستون و تغییر حجم خاک به طور پیوسته ثبت می‌گردد. کولن و همکاران (۱۱)، لارسون و



شکل ۱. منحنی فشردگی خاک که در آن حجم ویژه در برابر لگاریتم تنش را نشان می‌دهد. RCL و VCL به ترتیب نشانگر خط فشردگی مجدد و خط فشردگی بکر است (۱۰)

جدول ۱. برخی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه<sup>۱</sup>

| OM   | CaCO <sub>۳</sub> | FC | FI   | PI   | SL  | PL   | LL   | رس | سیلت | شن | بافت     |
|------|-------------------|----|------|------|-----|------|------|----|------|----|----------|
| ۰/۴۲ | ۶۳                | ۲۵ | ۱۲/۳ | ۱۵/۲ | ۶/۷ | ۱۹/۰ | ۳۴/۲ | ۴۲ | ۴۶   | ۱۲ | رس سیلتی |

<sup>۱</sup> OM, FC, FI, PI, SL, PL, LL به ترتیب بیان‌کننده‌ی حد روانی، حد خمیری، حد انقباض، شاخص خمیری، شاخص تردی، گنجایش زراعی و موادآلی است که همگی به صورت درصد بیان شده‌اند.

سانتی‌متری) با بافت ریز از مزارع شرکت طرح توسعه نیشکر و صنایع جانبی اهواز تهیه شد. بافت خاک به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (۱۸). حدود پایداری خاک، شامل حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و حد انقباض (SL) به روش استاندارد BS اندازه گرفته شد (۱۴). تفاوت LL و PL به عنوان شاخص خمیری (PI) و تفاوت PL و SL به عنوان شاخص تردی (FI) محاسبه گردید. درصد آهک و موادآلی به ترتیب به روش‌های خشتی‌کردن با اسید و سوزاندن تر اندازه‌گیری شد (۲۱). مقدار گنجایش زراعی (FC) به روش صفحات فشاری در فشار ۰/۳ بار و با سه تکرار تعیین شد. برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

#### روش تهیه نمونه‌های خاک

در ابتدا خاک رویین هوا-خشک بدون کوبیدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس با توجه به این‌که آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های بدون تروخشک شدن و نمونه‌هایی که تحت فرآیند تروخشک شدن قرار گرفته انجام می‌شد، نمونه‌ها به دو

همکاران (۱۳) و مصدقی و همکاران (۱۵) از آزمایش فشردگی محصور برای ارزیابی تراکم‌پذیری خاک‌ها استفاده کردند. در آزمایش نشست صفحه‌ای، بر یک صفحه روی سطح خاک، بارگذاری عمودی انجام گرفته و نشست عمودی خاک اندازه‌گیری می‌شود (۲).

کاساگراندا برای اولین بار روشی برای یافتن  $\sigma_{pc}$  از روی منحنی نسبت پوکی- لگاریتم تنش ارائه نمود. در این روش، مختصات نقطه تقاطع خط VCL و نیم‌ساز خط افقی و خط مماس بر نقطه‌ی انحنا‌ی بیشینه‌ی منحنی به عنوان تنش پیش‌تراکمی در نظر گرفته می‌شود (۴). هدف این پژوهش، ارزیابی تأثیر چرخه‌های تروخشک شدن بر برآورد مقدار تنش پیش‌تراکمی یک خاک ریزبافت با استفاده از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT) بود.

#### مواد و روش‌ها

##### ویژگی‌های خاک مورد بررسی

برای انجام این پژوهش، یک نوع خاک رویین (عمق صفر تا ۲۰

روش زیر آماده گردیدند:

در نوع اول که بدون تروخشک شدن بود، با توجه به حجم ظرف آزمایش (قطر ۲۵/۵ و ارتفاع ۸ سانتی متر) و چگالی ظاهری خشک معادل با ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب و نیز دو سطح رطوبتی ۰/۹ حد خمیری (PL) و ۱/۱ PL، مقدار خاک و آب مورد نیاز محاسبه گردید. سپس خاک درون سینی فلزی ریخته شد و آب به کمک آب فشان به آن اضافه گردید و به مدت ۴۵ دقیقه ورز داده شد. سپس خاک مرطوب به سینی کوچک تری منتقل گردید و روی سطح خاک با پارچه‌ی مرطوب و روکش پلاستیکی پوشانده شد و به مدت ۲۴ ساعت باقی ماند تا رطوبت به طور یکنواخت در آن توزیع گردد. پس از گذشت ۲۴ ساعت، خاک مرطوب به صورت لایه لایه (سه لایه ۲/۶۶ سانتی متر)، در ظرف ریخته شد تا فشردگی یکنواختی با عمق نمونه به دست آید. در هر لایه با ضربه‌های آهسته‌ی چکش چوبی خاک فشرده گردید تا چگالی ظاهری مرطوب خاک به مقدار مورد نظر رسید. پیش از اضافه کردن لایه‌ی جدید شیارهایی در سطح لایه قبلی ایجاد شد.

در نوع دوم که نمونه‌ها با تروخشک شدن همراه بود، مجدداً با توجه به حجم ظرف (قطر ۲۵/۵ و ارتفاع ۸ سانتی متر) و چگالی ظاهری خشک برابر با ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب، مقدار خاک مورد نیاز تعیین گردید. پس از آن مقدار خاک محاسبه شده به درون ظرف ریخته شد. با وارد کردن ضربات آهسته به بدنه ظرف، ارتفاع به ۸ سانتی متر رسید تا چگالی مورد نظر ایجاد گردد. سپس سطح خاک صاف گردید و با یک روکش پلاستیکی که سوراخ‌هایی روی آن قرار داشت پوشانده شد.

با توجه به این که مقدار EC آب مورد استفاده برای آبیاری نقش مهمی در میزان سخت‌شدگی خاک دارد و هم‌چنین آب مورد استفاده برای آبیاری مزارع نیشکر دارای EC متغیر و بین ۱-۲/۵ ds/m است (مذاکره شفاهی با کارشناس آزمایشگاه خاک طرح توسعه نیشکر اهواز)، آبی با EC برابر با ۱/۶۵ ds/m تهیه گردید. مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن خاک به رطوبت FC محاسبه گردید و روی سطح پلاستیک ریخته شد. پس از فرو

رفتن کامل آب به درون خاک، روکش پلاستیکی برداشته شد و ظرف پس از وزن‌شدن به درون آون‌ی با دمای ۴۰ درجه سانتی گراد (میانگین دمای فصل رشد نیشکر) منتقل گردید. پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها مرتباً وزن شدند تا زمانی که رطوبت آن به مقدار ۰/۷ گنجایش زراعی (FC) (مقدار رطوبت خاک در موقع آبیاری) رسید. در این هنگام، رطوبت نمونه‌ها به منظور یکنواخت مرطوب شدن آن‌ها و نیز کم‌بودن مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن نمونه‌ها به رطوبت FC نسبت به مرحله اول مرطوب کردن، آب با استفاده از آب فشان به نمونه‌ها اضافه گردید و ظرف مجدداً درون آون قرار گرفت. مراحل مرطوب و خشک کردن هر ظرف محتوی خاک تا ۵ مرتبه و در مدت ۲۰-۱۵ روز انجام گرفت. در آخرین چرخه، خشک کردن نمونه‌ها تا زمانی که رطوبت نمونه‌های خاک به ۰/۹ PL یا ۱/۱ PL برسد، ادامه یافت. سپس نمونه‌ها با پارچه‌ی مرطوب و روکش پلاستیکی پوشانده شدند و به مدت ۲۴ ساعت باقی ماندند تا رطوبت به طور یکنواخت در آنها توزیع گردد. پس از تهیه‌ی نمونه، آزمایش‌ها به دو صورت ادامه یافت. در برخی از آزمایش‌ها پس از تهیه‌ی نمونه، سطح خاک بارگذاری شد و در برخی دیگر بدون اعمال بار تراکم‌کننده، مراحل بعدی انجام گرفت. در مورد نمونه‌های بارگذاری شده به این ترتیب عمل شد که روی سطح خاک صفحه‌ی فلزی سوراخ دار به قطر ۲۵ سانتی متر قرار داده شد و توسط دستگاه CBR بارگذاری با سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه بر نمونه وارد شد. پس از رسیدن بار به مقدار مورد نظر، نمونه به مدت ۳۰ دقیقه تحت بار نگه داشته شد. سپس در مرکز همه نمونه‌ها آزمایش PST انجام شد. برای انجام این آزمایش از یک صفحه‌ی دایره‌ای فلزی و صلب به قطر و ضخامت به ترتیب ۵۰ و ۵ میلی متر استفاده گردید. این صفحه در مرکز نمونه قرار گرفت و یک استوانه‌ی فلزی صلب به منظور جلوگیری از ایجاد اصطکاک بین سیلندر دستگاه CBR و خاک بر روی آن گذارده شد، سپس بار توسط سیلندر دستگاه CBR و با سرعت ۱ میلی متر در دقیقه و تا نشست ۱۰ میلی متر انجام گرفت. پس از آن منحنی لگاریتم تنش-نشست برای تعیین تنش پیش-تراکمی،

در دامنه‌ی نشست ۱۰- میلی‌متر رسم گردید. استوانه‌ی درنظر گرفته برای آزمایش فشردگی محصور دارای قطر و ارتفاع به ترتیب ۵۴ و ۴۹ میلی‌متر بود. به‌منظور کاهش اصطکاک بین دیواره‌ی استوانه و خاک، پیش از تهیه‌ی نمونه، درون آن با لایه‌ی نازکی از گریس پوشانده شد. پس از تهیه‌ی نمونه، یک صفحه‌ی صلب فلزی به قطر ۵۰ میلی‌متر روی سطح آن قرار داده شد و بارگذاری توسط سیلندر CBR روی این صفحه انجام گرفت. زمان خروج آب از انتهای نمونه به‌عنوان پایان آزمایش درنظر گرفته شد (۷). سپس منحنی لگاریتم تنش- کرنش برای بررسی رفتار خاک ترسیم گردید. تنش پیش-تراکمی در آزمایش‌های PST و CCT با استفاده از روش کاساگراند تعیین شد.

در این پژوهش تأثیر دو سطح رطوبتی (۹/۰PL و ۱/۱PL)، سه سطح بار متراکم‌کننده (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) در شرایط با و بدون چرخه‌های تروخسک شدن، بر پارامترهای تنش پیش-تراکمی خاک با آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار بررسی گردید. در صورت معنی‌دار بودن اثر هر عامل و برهم‌کنش آنها، میانگین آنها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد با هم مقایسه شدند. از نرم‌افزارهای SAS و Excel برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. به‌منظور مقایسه‌ی مقادیر برآورد شده با آزمایش‌های نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور با بار متراکم‌کننده اعمالی به نمونه‌ها، از آزمون  $t$  جفت‌شده استفاده گردید.

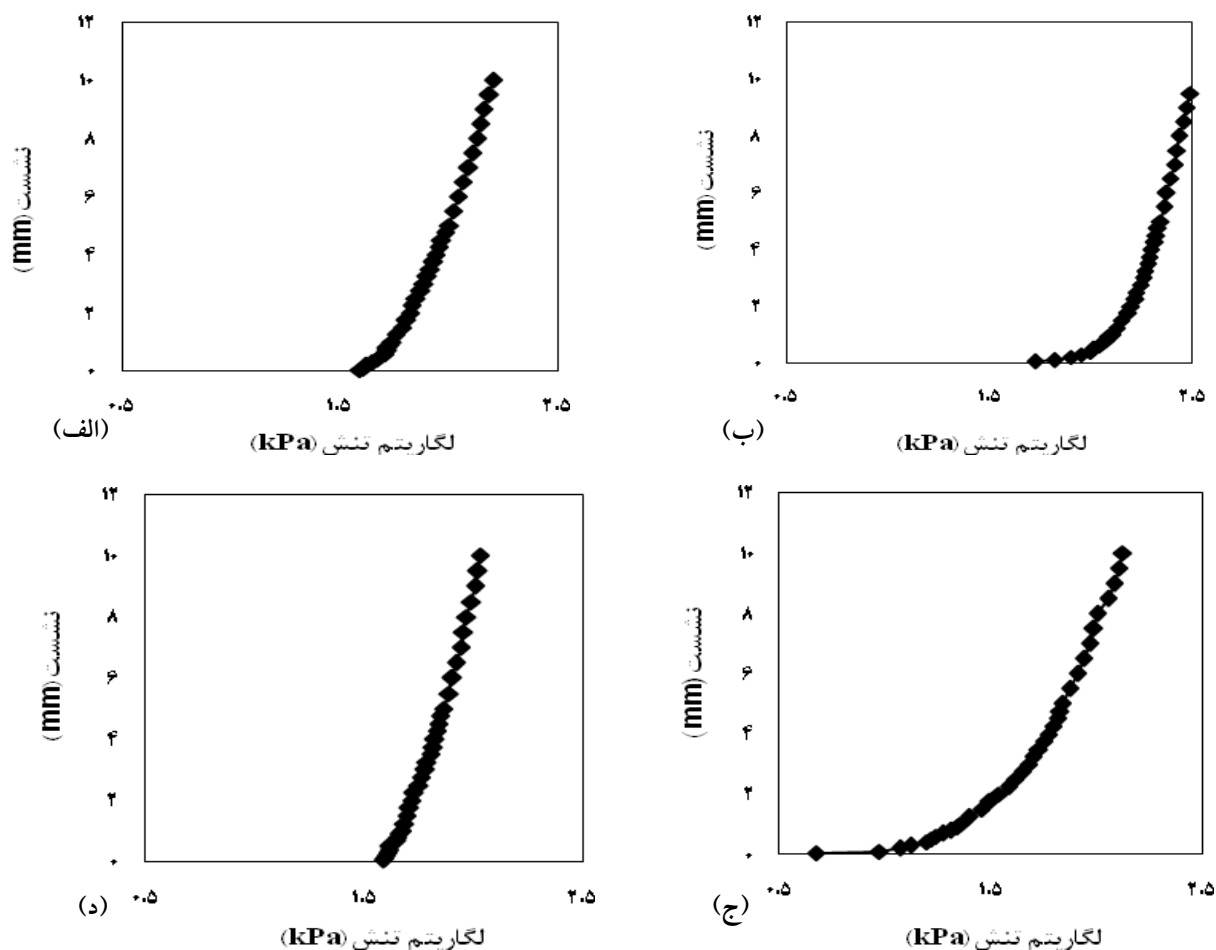
## نتایج و بحث

نمونه‌هایی از منحنی لگاریتم تنش-نشست در آزمایش PST، در شکل ۲ نشان داده شده است. نمودار لگاریتم تنش-نشست در نمونه‌های بازسازی‌شده و بدون فرآیند تروخسک شدن و به‌ویژه در رطوبت ۱/۱PL، بیشتر شبیه رفتار خاک با فشردگی عادی (Normal compression) است و رفتار خاک عمدتاً در راستای خط فشردگی بکر (VCL) می‌باشد (شکل ۲ الف و ج). در این نمونه‌ها، تغییر انحنای منحنی در ناحیه بحرانی (تغییر از حالت الاستیک به خمیری) بسیار تدریجی است. در صورتی‌که در اثر

فرآیند تروخسک شدن، خاک حالت فوق فشردگی (Over-compression) پیدا نموده و دو ناحیه‌ی منحنی (ناحیه فشردگی مجدد و خط فشردگی بکر) خیلی مشخص‌تر می‌باشد و شکل منحنی آن از منحنی دو جزیبی خطی (Bi-linear curve) تابعیت می‌کند. این نوع رفتار برای نمونه‌های دست‌نخورده و تحت آزمایش تک‌محوری در پژوهش‌های تانگ و همکاران نیز گزارش شده است (۱۹). در نمونه‌های بازسازی‌شده و بدون اعمال بار، مقاومت فشاری (تنش پیش-تراکمی؛  $\sigma_{pc}$ ) عمدتاً به‌علت تشکیل پیوندهای آبی (هلال‌های آبی) بین ذرات خاک در مدت ۲۴ ساعت نگه داشتن نمونه‌ها می‌باشد (۹). ولی، در خاک‌هایی که تحت فرآیند تروخسک شدن قرار گرفته بودند، آرایش مجدد ذرات در فرآیند تروخسک شدن و احتمالاً رسوب ذرات رس بین ذرات درشت‌تر (شن و سیلت) و صاف شدن رویه‌های تماس خاکدانه‌ها، در اثر تغییر شکل ویسکوز در پاسخ به‌کشش داخلی هلال‌های آبی بین خاکدانه‌ها، موجب ظهور حالت فوق فشردگی در خاک شده است (۶). در این حالت، خاک برای تغییر از حالت الاستیک به‌خمیری، نیاز به سطح تنش بیشتری دارد و بنابراین مقاومت فشاری (تنش پیش-تراکمی) بیشتر از خود نشان داد.

نمونه‌هایی از منحنی لگاریتم تنش-کرنش در آزمایش CCT در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودار از منحنی S-شکل (Sigmoid) تابعیت می‌کند. این نوع رفتار در آزمایش تک‌محوری برای خاک‌های با درصد رس و یا رطوبت زیاد، توسط تانگ و همکاران نیز گزارش شده است (۱۹). در مدل S-شکل در تنش‌های بالا، انتهای منحنی فشردگی از راستای خطی منحنی فشردگی بکر منحرف می‌شود. این رفتار با افزایش درجه‌ی اشباع خاک در اواخر آزمایش فشردگی و غیرقابل تراکم شدن خاک، قابل تفسیر است.

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) داده‌های حاصل از آزمایش‌های PST و CCT، نشان می‌دهد که اثر تروخسک شدن، رطوبت و مقدار بار متراکم‌کننده بر تنش پیش-تراکمی برآورد شده در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل دوگانه‌ی رطوبت و مقدار بار بر تنش پیش-تراکمی برآوردشده

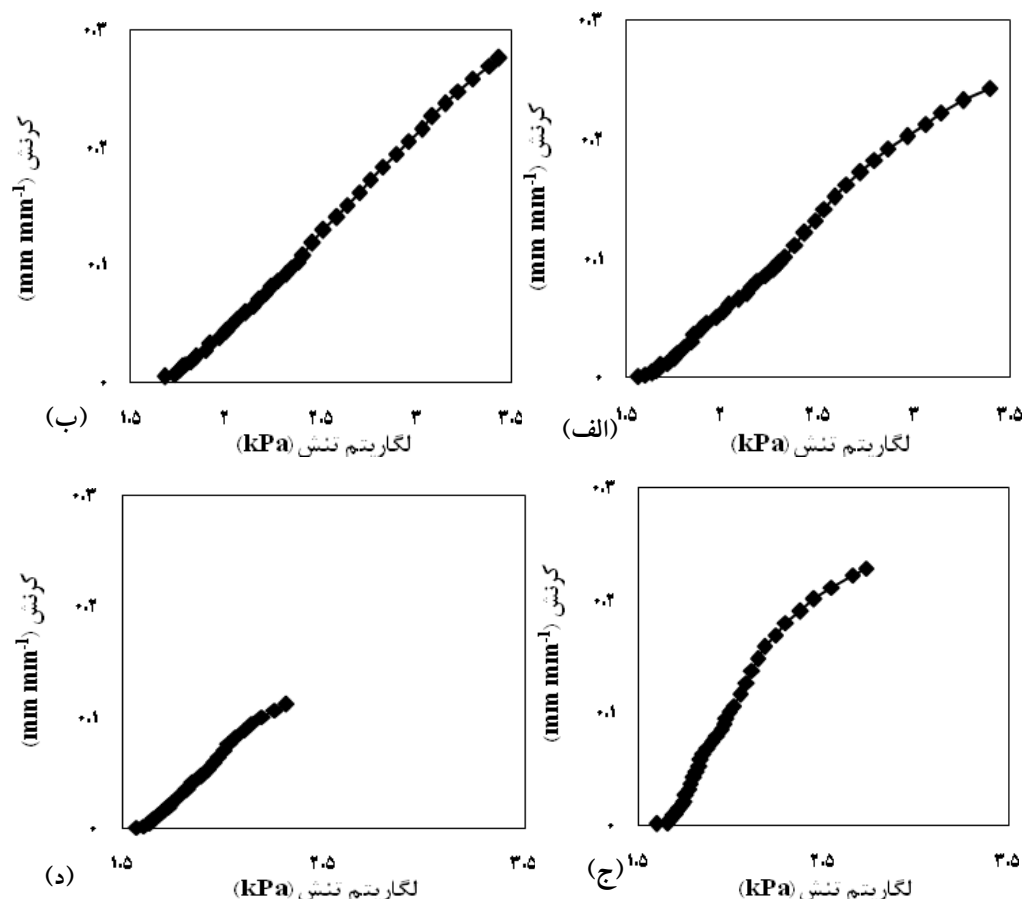


شکل ۲. نمونه‌هایی از نمودار لگاریتم تنش-نشست خاک رس سیلتی در آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) بدون بار متراکم‌کننده، الف) رطوبت ۰/۹PPL بدون تروخشک شدن، ب) رطوبت ۰/۹PPL با تروخشک شدن، ج) رطوبت ۱/۱PPL بدون تروخشک شدن و د) رطوبت ۱/۱PPL با تروخشک شدن.

ظاهری (Apparent pre-compaction stress) نامید. مقادیر تنش پیش‌تراکمی در حالت بدون بار متراکم‌کننده می‌تواند به دلیل تشکیل پیوندهای آبی (هال‌های آبی) بین ذرات خاک در مدت ۲۴ ساعت، نگه داشتن نمونه‌ها باشد. تروخشک شدن خاک سبب افزایش بیش-تخمینی تنش پیش‌تراکمی برآورد شده گردید (شکل ۴ ب)). زیرا هنگامی که خاک تحت چرخه‌های تروخشک قرار می‌گیرد، خاکدانه‌ها در محل تماسشان به هم می‌پیوندند (۶) و موجب افزایش چگالی ظاهری (BD) خاک از  $1/20$  به  $1/30$  سانتی متر مکعب شد و در نتیجه مقاومت فشاری (تنش پیش-تراکمی) خاک افزایش یافت. بنابراین، فرآیند تروخشک شدن خاک، موجب بیش-تخمینی در برآورد تنش پیش-تراکمی ظاهری شد (تعیین شده با آزمایش نشست

در آزمایش‌های CCT و PST به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل دوگانه‌ی مقدار بار متراکم‌کننده و تروخشک شدن بر این پارامتر در هر دو آزمایش CCT و PST در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود.

در آزمایش نشست صفحه‌ای برای تمام سطوح بار متراکم‌کننده، با افزایش مقدار رطوبت از ۰/۹PPL به ۱/۱PPL، مقدار بیش-تخمینی تنش پیش-تراکمی برآورد شده‌ی خاک، کاهش یافت (شکل ۴ الف)). تنش پیش-تراکمی براساس تنش مؤثر (Effective stress) تعریف می‌شود، ولی در این پژوهش به علت این که تغییرات فشار آب منفذی در حین آزمایش اندازه‌گیری نشد، تنش پیش-تراکمی بر حسب تنش کل (Total stress) بیان شد. بنابراین، مقادیر محاسبه شده را می‌توان تنش پیش‌تراکمی



شکل ۳. نمونه‌هایی از نمودار لگاریتم تنش-نشست خاک رس سیلتی در آزمایش فشردگی محصور (CCT)، بدون بار متراکم کننده، (الف) رطوبت ۰/۹ PPL بدون تروخشک شدن، (ب) رطوبت ۰/۹ PPL با تروخشک شدن، (ج) رطوبت ۱/۱ PPL بدون تروخشک شدن و (د) رطوبت ۱/۱ PPL با تروخشک شدن.

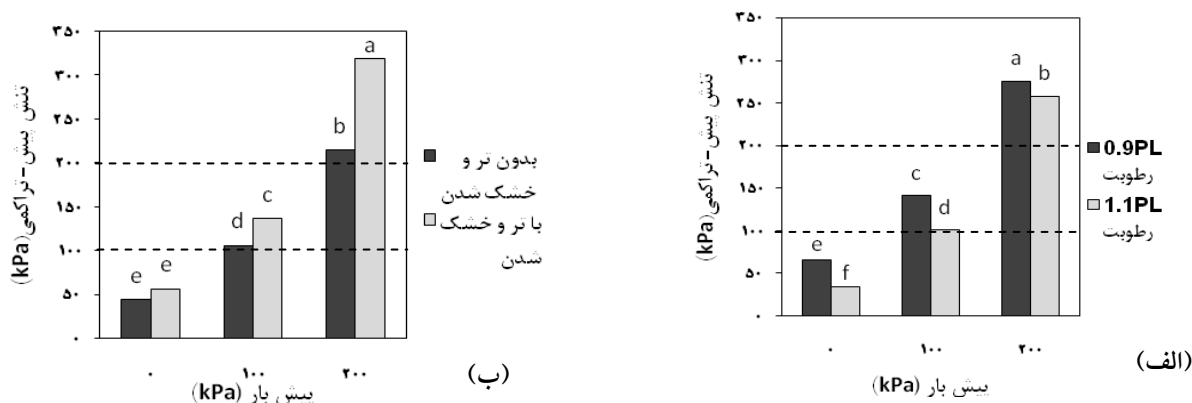
رطوبت‌های ۰/۹ PPL و ۱/۱ PPL، به ترتیب بیش و کم-تخمینی داشت (شکل ۵ (الف)). تروخشک شدن خاک نسبت به حالت بدون تروخشک شدن در سطح بار ۲۰۰ کیلوپاسکال، سبب کاهش بیش-تخمینی تنش پیش-تراکمی برآورد شده گردید، اما در بار متراکم کننده‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال، بیش-تخمینی تنش پیش-تراکمی با تروخشک شدن به طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۵ (ب)). نتایج آزمون  $t$  جفت شده در آزمایش CCT، نشان داد که در هر دو حالت با و بدون تروخشک شدن، برای بار متراکم کننده ۱۰۰ کیلوپاسکال، اختلاف معنی‌داری بین بار وارده و مقادیر برآورد شده وجود نداشت، اما در بار متراکم کننده‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال، این اختلاف معنی‌دار بود. بنابراین این روش نمی‌تواند در بارهایی که موجب نزدیک شدن حالت خاک به اشباع می‌شود، برآورد صحیحی داشته باشد.

صفحه‌ای که این افزایش در حالت مرطوب (۰/۹ PPL) بیشتر از حالت خیس (۱/۱ PPL) می‌باشد (جدول ۳). نتایج آزمون  $t$  جفت شده نشان داد که برای حالت بدون تروخشک شدن، در هر دو سطح بار متراکم کننده (۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال)، اختلاف معنی‌داری بین بار وارد شده به نمونه و مقادیر برآورد شده از آزمایش PST وجود نداشت. پس می‌توان برای خاک‌های خاک‌ورزی شده به منظور تعیین پارامترهای تراکمی آن، از این روش به عنوان یک روش سریع و قابل اجرا در آزمایشگاه و مزرعه استفاده نمود. در صورتی که برای خاک تروخشک شده، مقادیر برآورد شده به طور معنی‌داری بیشتر از بار متراکم کننده‌ی خاک بود. در آزمایش فشردگی محصور (CCT)، در هر سطح بار متراکم کننده (۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال)، تنش پیش-تراکمی برآورد شده در

جدول ۲. خلاصه تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های CCT و PST

| تنش پیش-تراکمی |              | درجه آزادی | منابع تغییرات        |
|----------------|--------------|------------|----------------------|
| فشرده‌گی محصور | نشست صفحه‌ای |            |                      |
| ۱۲۱۹۴/۰**      | ۲۳۹۸۰/۵**    | ۱          | تروخشک شدن (A)       |
| ۲۸۸۴۰/۰**      | ۸۴۵۰/۵**     | ۱          | رطوبت (B)            |
| ۱۵۹۶۵۲/۷**     | ۲۹۹۶۶۷**     | ۲          | بار متراکم‌کننده (C) |
| ۱۴۱۳/۳**       | ۴۸۰۲**       | ۱          | A×B                  |
| ۱۹۵۹/۳**       | ۴۹۶۲/۱**     | ۲          | A×C                  |
| ۶۱۳۸/۵**       | ۸۵۶/۵*       | ۲          | B×C                  |
| ۷۰۱۸/۹**       | ۲۳۶۶**       | ۲          | A×B×C                |
| ۷۶/۶           | ۱۸۰/۸۶       | ۴۸         | خطای آزمایش          |

\* و \*\* به ترتیب بیان‌گر اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪ و ns عدم وجود اثر معنی‌دار می‌باشد.



شکل ۴. الف) اثر متقابل رطوبت و بار متراکم‌کننده و ب) اثر متقابل تروخشک شدن و بار متراکم‌کننده بر تنش پیش-تراکمی در آزمایش PST (تعیین شده به روش کاساگراندا). میانگین‌های دارای حروف مشابه، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ براساس آزمون LSD ندارند.

روش‌های CCT و PST نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رابطه معنی‌داری بین آن‌ها دیده نمی‌شود. در این خاک، به دلیل اشباع شدن سریع نمونه طی آزمایش CCT، مقادیر به‌دست آمده با بار متراکم‌کننده‌ی اولیه هم‌خوانی ندارد. در نتیجه، این روش نمی‌تواند به‌عنوان روشی مناسب برای تخمین ظرفیت باربری این خاک، استفاده شود.

برآورد تنش پیش-تراکمی تعیین‌شده با آزمایش فشرده‌گی محصور (CCT) در سطوح رطوبتی و بار متراکم‌کننده‌ی متفاوت، به‌علت تمایل به اشباع شدن نمونه در حین آزمایش، یکنواخت نبود (جدول ۴)، بنابراین، روش فشرده‌گی محصور، به‌عنوان روشی مطمئن برای برآورد ظرفیت باربری این گونه خاک‌ها محسوب نمی‌شود. در شکل ۶ رابطه‌ی بین تنش پیش-تراکمی به‌دست آمده از

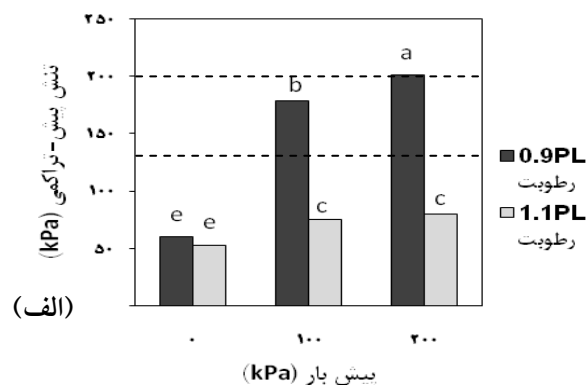
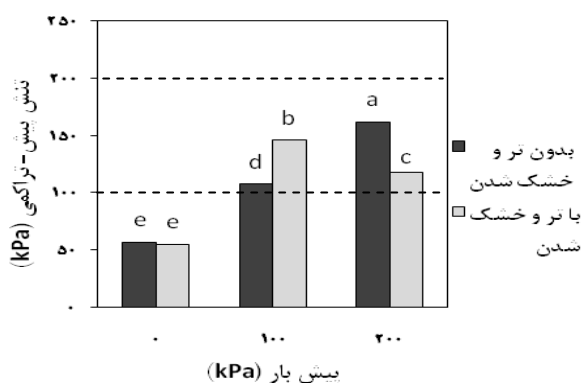
جدول ۳. اثر متقابل رطوبت، بار متراکم‌کننده و تروخشک شدن بر تنش پیش-تراکمی (kPa) در آزمایش PST

| پیش بار<br>(kPa) | رطوبت                                |                          |                          |                         |
|------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                  | ۱/۱PL                                |                          | ۰/۹PL                    |                         |
|                  | بدون تروخشک شدن                      | با تروخشک شدن            | بدون تروخشک شدن          | با تروخشک شدن           |
| ۰                | ۶۱/۹ <sup>fg</sup> ±۴/۶ <sup>+</sup> | ۶۹/۳ <sup>f</sup> ±۴/۱   | ۲۶/۱ <sup>h</sup> ±۱/۲   | ۴۳/۵ <sup>gh</sup> ±۳/۹ |
| ۱۰۰              | ۱۱۶/۲ <sup>e</sup> ±۰/۸              | ۱۶۶/۹ <sup>d</sup> ±۱۶/۳ | ۹۵/۷ <sup>e</sup> ±۹/۵   | ۱۰۶/۷ <sup>e</sup> ±۵/۸ |
| ۲۰۰              | ۲۱۳/۴ <sup>c</sup> ±۱۱/۹             | ۳۳۸/۳ <sup>a</sup> ±۱۰/۴ | ۲۱۷/۰ <sup>c</sup> ±۱۱/۷ | ۲۹۸/۹ <sup>b</sup> ±۳/۵ |

میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ براساس آزمون LSD ندارند.

<sup>+</sup>ارقام پس از  $\pm$  انحراف استاندارد می‌باشد.

PL: حد خمیری خاک.



شکل ۵. الف) اثر متقابل رطوبت و بار متراکم‌کننده و ب) اثر متقابل تروخشک شدن و بار متراکم‌کننده بر تنش پیش-تراکمی در آزمایش CCT (تعیین شده به روش کاساگرانده). میانگین‌های دارای حروف مشابه، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ براساس آزمون LSD ندارند.

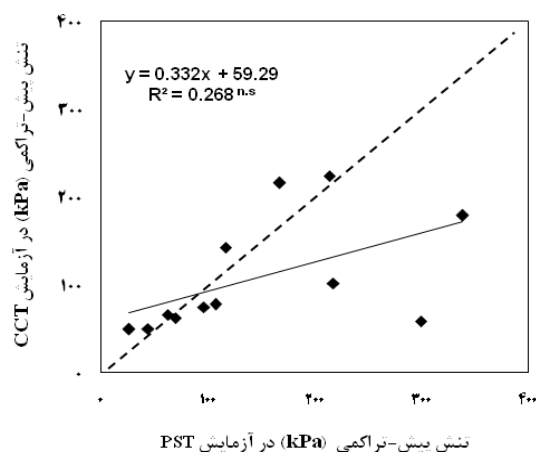
جدول ۴. اثر متقابل رطوبت، بار متراکم‌کننده و تروخشک شدن بر تنش پیش-تراکمی (kPa) در آزمایش CCT

| پیش بار<br>(kPa) | رطوبت                                 |                          |                          |                         |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                  | ۱/۱PL                                 |                          | ۰/۹PL                    |                         |
|                  | بدون تروخشک شدن                       | با تروخشک شدن            | بدون تروخشک شدن          | با تروخشک شدن           |
| ۰                | ۶۵/۴ <sup>efj</sup> ±۵/۷ <sup>+</sup> | ۶۱/۵ <sup>ghi</sup> ±۲/۳ | ۴۸/۸ <sup>i</sup> ±۰/۶   | ۴۹/۳ <sup>i</sup> ±۳/۲  |
| ۱۰۰              | ۱۴۲/۰ <sup>c</sup> ±۳/۷               | ۲۱۵/۵ <sup>a</sup> ±۴/۹  | ۷۳/۸ <sup>efj</sup> ±۸/۹ | ۷۷/۱ <sup>ef</sup> ±۷/۹ |
| ۲۰۰              | ۲۲۳/۴ <sup>a</sup> ±۶/۸               | ۱۷۸/۵ <sup>b</sup> ±۱/۶  | ۱۰۱/۴ <sup>d</sup> ±۰/۶  | ۵۷/۸ <sup>hi</sup> ±۱/۲ |

میانگین‌های که در یک حرف لاتین مشترک‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ براساس آزمون LSD ندارند.

<sup>+</sup>ارقام پس از  $\pm$  انحراف استاندارد می‌باشد.

PL: حد خمیری خاک.



شکل ۶. رابطه‌ی بین میانگین مقادیر تنش پیش-تراکمی به‌دست آمده از روش کاساگراند در آزمایش‌های CCT و PST.

### نتیجه‌گیری

افزایش مقدار رطوبت از ۹/۰٪ حد خمیری (PL) به ۱/۱ PL، مقدار بیش-تخمینی تنش پیش-تراکمی ظاهری خاک کاهش یافت. در یک سطح رطوبتی معین، فرآیند تروخشک شدن موجب بیش-تخمینی مقادیر تنش پیش-تراکمی برآوردشده گردید. بنابراین، استفاده از ایده‌ی تنش پیش-تراکمی برای تعیین ظرفیت باربری خاک‌ها که در اثر فرآیند تروخشک شدن ساختار آنها تغییر می‌کند، عملی نیست. استفاده از آزمایش CCT به‌علت اشباع شدن سریع خاک‌های ریزبافت در حین آزمایش، روش مناسبی برای تعیین ظرفیت باربری این گونه خاک‌ها نمی‌باشد.

در این پژوهش، تأثیر چرخه‌های تروخشک شدن بر برآورد تنش پیش-تراکمی یک خاک ریزبافت با استفاده از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT) مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه‌های بازسازی‌شده و بدون چرخه‌های تروخشک شدن، برآورد تنش پیش-تراکمی ظاهری با استفاده از آزمایش PST با مقدار پیش‌بار اعمالی هم‌خوانی داشت. بنابراین، از آزمایش PST می‌توان برای خاک‌های کشاورزی به‌عنوان یک روش سریع و قابل اجرا برای تعیین ظرفیت باربری خاک‌های خاک‌ورزی شده استفاده نمود. با

### منابع مورد استفاده

1. Aghili Nategh, N., A. Hemmat, M. Sadeghi and M. Vafaeian. 2011. Soil bulk density, stress at compaction threshold and susceptibility to compaction as affected by long term incorporation of three types of manures. *Iran. J. Soil and Water Res.* 42: 87-98.
2. Alexandrou, A. and R. Earl. 1995. In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. *J. Agric. Eng. Res.* 61: 67-72.
3. Alexandrou, A. and R. Eral. 1998. Development of a techniques assessment the behavior of soil under load. *J. Agric. Eng. Res.* 71: 75-80.
4. Casagrande, A. 1936. The determination of preconsolidation load and its practical significance. *In: Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 22-26 June, Cambridge, MA, Vol. 3, pp. 60-64.
5. Cavalieri, K. M. V., J. Arvidsson, A. P. da Silva and T. Keller. 2008. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil Till. Res.* 98:17-26.
6. Dani or, T. and A. Ghezzehei. 2002. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. *Soil and Till. Res.* 64: 41-59.
7. Dawidowski, J. B. and A. J. Koolen. 1994. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil Till. Res.* 31: 277-282.

8. Day, P. R. and G. G. Holmgren. 1952. Microscopic changes in soil structure during compression. *Soil Sci. Soc. Proc.* 16: 73-77.
9. Hemmat, A., M. Tahmasebi, M. Vafaeian, and M. R. Mosaddeghi. 2009. Relationship between pre-compaction stress and shear strength under confined and semi-confined loadings for a sandy loam soil. *Biosys. Eng.* 102: 219-226.
10. Keller, T. and J. Arvidsson. 2007. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *Eur. J. Soil Sci.* 58: 1373-1381.
11. Koolen, A. J. 1976. Mechanical properties of precompacted soil as affected by the moisture content at precompaction. 7<sup>th</sup> ISTRO Conf., Uppsala, Sweden 20: 1-6.
12. Koolen, A.J. 1994. Mechanics of soil compaction. PP: 45-69. *In: Soane, B.D., and van Ouwerkerk, C. (Eds.), Soil Compaction in Crop Production.* Elsevier Pub., Amsterdam.
13. Larson, W. E., S. C. Gupta and R. A. Usech. 1980. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 450-457.
14. McBride RA. 1993. Soil consistency limits .*In: Soil Sampling and Methods of Analysis* (Carter, M.R., ed) PP. 519-527. Lewis Publications/CRC Press, Boca Raton, FL.
15. Mosaddeghi, M. R., M. A. Hajabbasi, A. Hemmat and A. Alexandrou. 2004. Determination of pre-compaction stress of in situ tractor pre-compacted soil by plate sinkage and confined compression tests. *Proc. CIGR. Int. Conf.* Beijing, China, on CD-ROM. October 11-14.
16. Mullins, C.E., D.A. Macleond, K.H. Northcote, J.M. Tisdall and I.M. Young. 1990. Hardsetting soils: behavior occurrence and management. *Adv. Soil Sci.* 11: 37-108.
17. Soane, B. D. 1990. The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. *Soil Till. Res.* 16: 179-201.
18. Sheldrick, B. H. and C. Wang. 1993. Particle size distribution. PP. 4499-511. *In: Carter M. R. (Ed.), Soil sampling and methods of analysis.* CRC Press, Boca Raton, FL.
19. Tang, A. M., Y. J. Cui, J. Eslami and P. Défossez. 2009. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. *Geoderma* 148: 282-290.
20. Torres, J. S. and J. E. Pantoja. 2005. Soil compaction due to mechanical harvesting in wet soil. *Proc. Cong. Int. Soc. Sugarcane Tech.* PP. 332-339.
21. Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the effect of the digestive method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.