

## تاثیر اضافه کردن دراز- مدت سه نوع کود آلی بر چگالی ظاهری، تنش در آستانه تراکم و حساسیت به تراکم خاک

ناهید عقیلی ناطق<sup>۱</sup>، عباس همت<sup>۲\*</sup>، مرتضی صادقی<sup>۳</sup> و محمود وفائیان<sup>۴</sup>  
<sup>۱</sup> دانش آموخته سابق کارشناسی ارشد، <sup>۲</sup>استاد، <sup>۳</sup>استادیار و <sup>۴</sup>استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان  
 (تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۷/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۱۱/۱۹)

### چکیده

تراکم خاک به عنوان تهدیدی در برابر بهره‌وری طولانی - مدت خاک‌های کشاورزی محسوب می‌شود. دو خاصه مکانیکی که از منحنی لگاریتم تنش - کرنش خاک استخراج می‌شوند عبارتند از: تنش پیش‌تراکمی که نقطه گذار از رفتار الاستیک به رفتار همراه با تغییر شکل ماندگار خاک می‌باشد، و دیگری شیب قسمت خطی منحنی فشردگی بکر (رفتار خاک در تنش‌های زیاد) که بنام شاخص فشردگی نامیده می‌شود. در این تحقیق، نمونه‌های خاک سطحی از طرحی که در آن کودهای آلی (لجن فاضلاب، کمپوست و کود گاوی) در چهار سطح (۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار) و یک ترکیب کودشیمیایی (۲۵۰ کیلوگرم فسفات آمونیوم در هکتار و ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار) به مدت ۷ سال متوالی در تناوب گندم- ذرت به یک خاک لوم رسی سیلتی اضافه شده بود، تهیه گردیدند. تاثیر کودها و رطوبت (۱۷/۱ و ۲۰/۹ درصد) بر تنش پیش - تراکمی و شاخص فشردگی خاک با دو طرح فاکتوریل و مقایسه اورتوگونال در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار بررسی گردید. با افزایش کربن آلی، چگالی ظاهری خاک پس از فشردگی در هر دو رطوبت افزایش کمتری یافت. کمترین افزایش در چگالی خاک در تیمار ۱۰۰ تن لجن فاضلاب در هکتار و در رطوبت ۱۷/۱ درصد مشاهده گردید. در رطوبت یکسان، تنش پیش‌تراکمی ظاهری خاک‌هایی که کودهای آلی در مقادیر زیاد (۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار) به آن‌ها اضافه شده بود، به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد به‌دست آمد. اثر مقادیر کود در انواع کود آلی تقریباً مشابه بود. رابطه خطی و منفی معنی‌داری بین شاخص فشردگی و کربن آلی در رطوبت ۲۰/۹ درصد مشاهده شد، در صورتی‌که این رابطه برای رطوبت ۱۷/۱ درصد معنی‌دار نبود. کاهش شاخص تراکم و تنش پیش‌تراکمی، خاک تیمار شده با کودشیمیایی نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود. به‌طور کلی با وجود کربن آلی زیاد در خاک، سطح تنش در آستانه تراکم افزایش و حساسیت به تراکم خاک در رطوبت‌های بالا کاهش می‌یابد، بنابراین افزودن مواد آلی به خاک در نرخ زیاد، صرف‌نظر از نوع آن، می‌تواند به عنوان وسیله ای جهت افزایش مقاومت به تراکم در خاک‌های مناطق ایران مرکزی پیشنهاد شود.

**واژه های کلیدی:** آزمایش فشردگی محصور، آزمایش نشست صفحه‌ای، لجن فاضلاب، کمپوست، کود گاوی

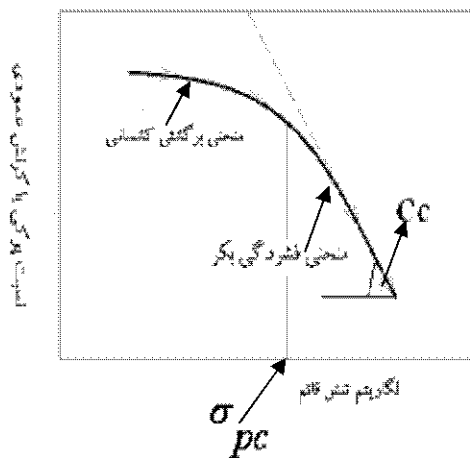
### مقدمه

برای نشان دادن میزان تغییر در ویژگی‌های خاک است. در گذشته تغییر برخی خواص فیزیکی از قبیل: چگالی ظاهری، تخلخل و نسبت پوکی، برای تعیین تراکم‌پذیری خاک استفاده شده است (Cullery, 1993). خواص مکانیکی خاک نیز در تعیین حدود تنش مجاز برای جلوگیری از تراکم خاک مهم می‌باشند. دو پارامتر مهم که از منحنی تنش - کرنش خاک در آزمایش فشردگی قابل استخراج اند، عبارتند از: تنش پیش-تراکمی (Precompaction stress;  $\sigma_{pc}$ ) و شاخص فشردگی (Compression index;  $C_c$ ) (Keller and Arvidsson, 2007; Rucknagel et al., 2007). این دو ویژگی معرف مشخصه فشردگی خاک می‌باشند که از طریق رسم لگاریتم (معمولاً به مبنای ده) تنش قائم در مقابل نسبت پوکی خاک یا کرنش عمودی به‌دست می‌آیند (شکل ۱). با کمک این ویژگی‌ها می‌توان منحنی تنش - کرنش را به دو ناحیه مجزا تقسیم کرد: ۱-

تراکم خاک عبارت است از کاهش تخلخل خاک همراه با خروج هوا از منافذ آن. به علت طبیعت پلاستیک (ماندگار) تغییر شکل ایجاد شده در اثر تردد ماشین‌های سنگین در حالت تر روی سطح خاک، پس از بر طرف شدن نیروهای خارجی، حجم منافذ به حالت اول بر نمی‌گردد (Johnson et al., 2002). تراکم خاک موجب تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود و این امر منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصولات، افزایش فرسایش ادوات و توان مورد نیاز خاک‌ورزی می‌گردد (Soane et al., 1981). تعیین درجه تراکم‌پذیری خاک نیازمند تعیین شاخصی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ahemmat@cc.iut.ac.ir

کاهش قابلیت تر شدن خاکدانه‌ها (Soane, 1990). بسته به نوع مواد آلی و توزیع آن‌ها در خاک هرکدام از مکانیسم‌های فوق سهم متفاوتی در توجیه اثر مواد آلی دارند.



شکل ۱- ویژگی‌های منحنی مشخصه تراکم خاک. ارتباط نسبت پوکی یا کرنش عمودی خاک با افزایش تنش فشاری.  $\sigma_{pc}$  و  $C_c$  به ترتیب تنش پیش-تراکمی و شاخص فشردگی اند (Gregory et al., 2009).

خاصیت ارتجاعی کود آلی از انتقال تنش‌ها به خاک زیرسطحی جلوگیری می‌کند (Soane, 1990). بنابراین کود مانند یک ضربه‌گیر در کاهش ضربه ماشین‌ها به خاک زیری عمل می‌کند (Hamza and Anderson, 2005). Mosaddeghi et al. (2000) نشان دادند که استفاده از ۱۰۰ و ۵۰ تن کود گاوی در هکتار به طور بارزی اثر بار وارده از طرف چرخ‌های تراکتور به خاک را خنثی می‌کند.

تاثیر ماده آلی بر حساسیت خاک به تراکم به خوبی مستند سازی نشده است (Soane, 1990). به ویژه، اطلاعات کامل در خصوص اثر متقابل ماده آلی، خاک‌های معدنی و رطوبت خاک در زمان تراکم وجود ندارد. Stone and Ekwue (1995) نشان دادند که با افزایش پیت به نمونه‌ای خاک بازسازی شده، شاخص فشردگی در خاک‌های لوم شنی و لوم رسی تغییر معنی داری نکرد؛ در حالی که در خاک رسی، این شاخص به طور معنی‌داری کاهش یافت. Zhang and Hartge (1995) گزارش نمودند که مخلوط کردن ماده آلی با خاک موجب کاهش چگالی ظاهری می‌شود، ولی تاثیری بر شاخص فشردگی نداشت. Imhoff et al. (2004) خواص فشردگی نمونه-ای خاک دست نخورده با درصد ماده آلی متفاوت را مطالعه نمودند و گزارش نمودند که ماده آلی تاثیر معنی‌اری بر تنش پیش‌تراکمی و شاخص فشردگی نداشت.

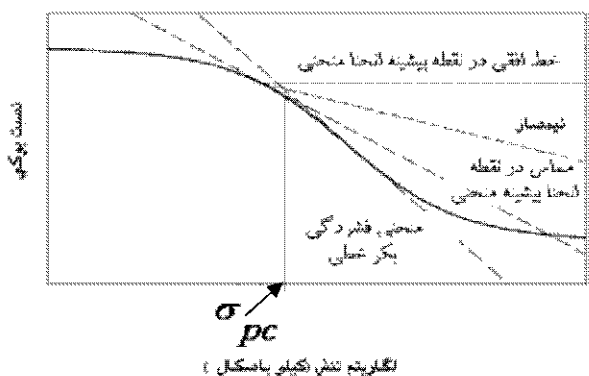
روش‌های آزمایشی متعددی برای تعیین منحنی فشردگی خاک وجود دارد. از آن جمله می‌توان از آزمایش فشاری تک

منحنی برگشتی کشسانی در تنش‌های پایین و ۲- منحنی فشردگی بکر (Virgin compression line; VCL) در تنش بالاتر. معمولاً قدر مطلق شیب قسمت خطی منحنی فشردگی بکر، شاخص فشردگی ( $C_c$ ) نام دارد. نقطه انتقال بین منحنی برگشتی کشسانی و منحنی فشردگی بکر به عنوان تنش پیش‌تراکمی ( $\sigma_{pc}$ ) شناخته می‌شود.  $\sigma_{pc}$  بیانگر حداکثر فشاری است که قبلاً خاک تجربه کرده است و به عنوان تنش در آستانه تراکم محسوب می‌شود و  $C_c$  معرف حساسیت یک خاک به تراکم است، اگر تنش وارده به خاک بیشتر از  $\sigma_{pc}$  شود.

مقدار تنش پیش‌تراکمی اهمیت قابل ملاحظه‌ای در مدیریت خاک دارد، زیرا حد اکثر فشاری را که یک خاک می‌تواند تحمل کند، قبل از این‌که در طول منحنی فشردگی بکر به طور غیر قابل برگشتی تغییر شکل ماندگار پیدا کند را نشان می‌دهد. Dias Junior (2000) مفهوم تنش پیش‌تراکمی را برای ارزیابی تاریخچه مدیریتی خاک به کار برد. او معتقد بود که  $\sigma_{pc}$  به عنوان شاخص کمی پایداری ساختمان خاک است، به طوری- که تغییرات  $\sigma_{pc}$  با رطوبت و پتانسیل ماتریک خاک به عنوان مشخصه مهمی برای ظرفیت باربری خاک و رشد ریشه می‌باشد. Silva et al. (2009) از تنش پیش‌تراکمی برای کمی کردن فشار بیشینه‌ای (فشار تماسی) که می‌توان به خاک اعمال نمود بدون آن‌که تراکم بیشتری در خاک ایجاد شود، استفاده نمودند.

فاکتورهایی همچون بافت، محتوای آب، چگالی ظاهری اولیه، نمک‌ها، کودهای آلی و شیمیایی، و نوع سیستم‌های خاک‌ورزی، بر مقاومت خاک به تراکم اثر می‌گذارند (Hamza and Anderson, 2005). رطوبت خاک مهم‌ترین فاکتور تاثیرگذار بر تراکم خاک است. مقاومت به تراکم با افزایش فشار منفی آب منفذی افزایش می‌یابد (Lipiec et al., 2002). به عبارت دیگر افزایش رطوبت خاک موجب کاهش ظرفیت تحمل بارخاک می‌شود (Imhoff et al., 2004).

به طور کلی، مواد آلی موجب مقاومت بیشتر خاک به تراکم می‌شود (O'Sullivan, 1992). ولی به نظر می‌رسد که تاثیر ماده آلی بر تراکم‌پذیری خاک بستگی به رطوبت خاک در زمان اعمال بار دارد (Soane, 1990). موارد زیر به عنوان معمول‌ترین روش‌های توجیه اثر مواد آلی بر مقاومت به تراکم خاک ذکر گردیده است: تقویت پیوندهای داخلی و خارجی خاکدانه‌ها (تقویت پیوستگی)، افزایش قابلیت ارتجاعی خاک، اثر کاهش چگالی ظاهری خاک (پوک کنندگی) به دلیل مخلوط شدن مواد آلی با ماتریس خاک و اثر رشته‌ای مواد آلی زنده (ریشه‌ها) در خاک، تغییر موضعی در بار الکتریکی سطح ذرات خاک، تغییر در اصطکاک داخلی و ایجاد اثر نرم‌کنندگی در خاک و



شکل ۲- یافتن تنش پیش تراکمی به روش کاساگراند (Gregory et al., 2009).

محققان در ایران عمدتاً از چگالی ظاهری خاک و شاخص مخروطی (Cone index) برای ارزیابی تراکم خاک استفاده کرده‌اند، ولی این پارامترها به تنهایی برای پیش بینی ظرفیت باربری خاک کافی نیست. ظرفیت باربری خاک (تنش در آستانه تراکم) و حساسیت به تراکم خاک را می‌توان به ترتیب با تعیین تنش پیش تراکمی و شاخص فشردگی از منحنی فشردگی خاک به دست آورد. تحقیقات در زمینه اثر اضافه کردن دراز مدت کودهای آلی بر خواص فشردگی خاک (تنش پیش تراکمی و شاخص فشردگی) در ایران موجود نیست. در این تحقیق، تاثیر اضافه کردن طولانی - مدت کودهای آلی از منابع مختلف و با نرخ‌های متفاوت بر خواص فشردگی خاک بررسی گردید.

## مواد و روش‌ها

### ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

پس از پایان پروژه پژوهشی کودهای آلی که به مدت ۷ سال پیاپی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان واقع در لورک نجف آباد اجرا گردید، از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری تیمارهای آن، نمونه‌های خاک تهیه شدند. طرح آزمایشی پروژه پژوهشی کودهای آلی در مزرعه بصورت کرت‌های نواری بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور: الف- نوع کود (۱- شاهد (بدون کود)، ۲- لجن فاضلاب، ۳- کمپوست، ۴- کود دامی و ۵- کود شیمیایی) و ب- مقدار کود (کود آلی (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار) و کود شیمیایی (۲۵۰ کیلوگرم فسفات آمونیوم در هکتار و ۲۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار) در سه تکرار اجرا شده بود. تناوب زراعی محصول در طول اجرای طرح گندم- ذرت علوفه‌ای بود. کودهای آلی سالانه یکبار در پاییز هنگام آماده‌سازی زمین جهت کاشت گندم به زمین داده شد. در تیمار کود شیمیایی، کود فسفات آمونیوم (۱۷٪ N و ۴۶٪ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) به مقدار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار هنگام آماده‌سازی زمین برای کاشت گندم و ذرت در زمان کاشت (کشت گندم پاییز و ذرت علوفه‌ای اواسط

محوری، فشردگی محصور (Confined Compression Test; CCT) و نشست صفحه‌ای (Plate Sinkage Test; PST) نام برد. در آزمایش فشردگی محصور، خاک در درون یک سیلندر صلب توسط یک پیستون متحرک به سمت پایین متراکم می‌شود و تنش روی پیستون و تغییر حجم خاک به طور پیوسته ثبت می‌شود. در این آزمایش باید نسبت قطر به ارتفاع نمونه زیاد باشد. این امر باعث کاهش اصطکاک بین خاک نمونه با جداره سیلندر، جلوگیری از کاهش تنش عمودی در قسمت پایین نمونه و همچنین به حداقل رساندن مسیر خروج آب برای سرعت بخشیدن به فرایند تراکم خاک می‌شود (Koolen, Larson, 1974; Larson and Gupta, 1974; Mosaddeghi et al., 2006) از آزمایش فشردگی محصور برای تعیین تراکم‌پذیری خاک‌های کشاورزی استفاده کردند.

یکی دیگر از راه‌های بررسی تراکم‌پذیری، آزمایش با صفحه بارگذاری و یا نشست صفحه‌ای می‌باشد. با استفاده از این آزمایش امکان تخمین تنش پیش‌تراکمی در محل وجود دارد (Alexandrou and Earl, 1995). آزمایش بر یک صفحه واقع بر سطح خاک، بارگذاری قائم صورت گرفته و نشست عمودی اندازه‌گیری شده و منحنی بار-نشست ترسیم می‌گردد که رفتار خاک را در مقابل تنش نشان می‌دهد. Alexandrou and Earl, (1995) و Mosaddeghi et al. (2006) از این آزمایش جهت تعیین تنش پیش‌تراکمی استفاده کردند.

اولین بار کاساگراند روشی برای یافتن حداکثر فشار گذشته وارده به خاک پیشنهاد کرد که از روی منحنی لگاریتم تنش-نسبت پوکی تعیین می‌شود (Casagrande, 1936). در این روش نقطه تقاطع امتداد خط فشردگی بکر (VCL) و نیمساز زاویه ای که خط افقی و خط مماس بر نقطه با انحنای بیشینه می‌سازد، به عنوان تنش پیش‌تراکمی معرفی می‌گردد (شکل ۲). در روش فوق قضاوت شخص در تعیین نقطه ای که انحناء منحنی بیشینه است، تاثیر گذار می‌باشد.

Dawidowski and Koolen (1994) روش نموداری کاساگراند را بصورت یک مدل کامپیوتری برای تعیین تنش پیش‌تراکمی ارائه نمودند. در این مدل تمامی مراحل تعیین نقاط و امتدادهای مهم جهت تعیین تنش پیش‌تراکمی با استفاده از روش‌های ریاضی و مشتق‌گیری صورت می‌گیرد. داده‌های خام ابتدا فیلتر می‌شوند تا هر گونه ناپیکنواختی در اثر خطای آزمایشی در تخمین تنش پیش‌تراکمی سر شکن شود.

CBR بار بر نمونه با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال گردید. پس از رسیدن بار به حد مورد نظر، نمونه به مدت ۳۰ دقیقه تحت بار باقی ماند.

### روش بارگذاری و شرایط آزمایش

پس از پیش‌بارگذاری، فوراً آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) در مرکز نمونه خاک پیش‌بارگذاری شده انجام شد. پس از پایان آزمایش نشست صفحه‌ای، یک نمونه (با قطر داخلی ۵۳/۵ و ارتفاع ۴۹ میلی‌متر) جهت انجام آزمایش فشردگی محصور (CCT) و یک نمونه استوانه‌ای (با قطر داخلی ۴۸ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر) جهت تعیین چگالی ظاهری از اطراف محل آزمایش PST تهیه گردیدند (شکل ۳).

در آزمایش PST، بارگذاری بر سطح خاک با استفاده از یک صفحه فلزی صلب با قطر ۵۰ میلی‌متر و با ضخامت ۵ میلی‌متر با دستگاه CBR با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت. به ازاء هر ۵/۵ میلی‌متر نشست مقدار بار وارده با استفاده از نیروسنج (حلقه گواه) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر قرائت گردید و منحنی بار-نشست رسم گردید. نشست ۲۰ میلی‌متر به عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته شد (Tahmasebi, et al, 2008). این در حالی است که پدیده تراکم خالص در آزمایش نشست صفحه‌ای تا محدوده نشست ۵ میلی‌متر صفحه بارگذاری رخ می‌دهد و از آن به بعد حرکت جانبی ذرات خاک شروع می‌شود (Keller et al., 2004). به این دلیل، تنها از داده‌ای ۵ میلی‌متر نشست صفحه جهت تعیین تنش پیش‌تراکمی استفاده شد.

در آزمایش CCT، جدار داخلی سیلندر نمونه برداری روغن‌کاری شد تا اصطکاک بین جداره ظرف و خاک به حداقل برسد و یک صفحه با قطر ۵۲ میلی‌متر بین سیلندر دستگاه CBR و نمونه خاک قبل بارگذاری قرار داده شد. اعمال بار توسط سیلندر دستگاه CBR بر نمونه با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید. بار وارده بر خاک در فواصل جابه‌جایی ۵/۵ میلی‌متر با استفاده از نیروسنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر قرائت شده و یادداشت گردید. پایان آزمایش، خروج آب از نمونه در نظر گرفته شد (Koolen, 1974).

### تعیین تنش پیش‌تراکمی و شاخص فشردگی

جهت تعیین تنش پیش‌تراکمی و شاخص تراکم، ابتدا معادلات چند جمله‌ای درجه چهار زیر (معادله ۱ و ۲) بر لگاریتم تنش-نشست (log σ-s) و لگاریتم تنش-کرنش (log σ-e) داده‌های تک تک تکرار هر آزمایش (هر آزمایش ۳ بار تکرار شد) به ترتیب حاصل از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT) برازش شدند. واحد تنش و نشست به ترتیب برحسب کیلو پاسکال و میلی‌متر است.

تابستان) با آخرین دیسک با خاک مخلوط شده بود. همچنین در همین تیمار ۲۵۰ کیلوگرم بر هکتار اوره (۴۶٪ N) به صورت سرک برای گندم و ذرت استفاده شده بود. خصوصیات کودهای آلی مورد استفاده در طرح در جدول (۱) آورده شده است.

منطقه‌ای که در آن مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان قرار دارد در ۴۰ کیلومتری جنوب غربی اصفهان و در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه شرقی واقع شده است. خاک مورد آزمایش جزء فامیل فاین - لومی، میکسد، ترمیک تیپیک هاپل آرجید است و در سری خاک خمینی شهر قرار می‌گیرد. نوع کانی‌های رسی کائولینیت، ایلیت، پلی‌گورسکایت، کلریت و کوارتز می‌باشد.

### روش تهیه نمونه‌های خاک در آزمایشگاه

پس از عبور خاک هوا خشک از الک ۲ میلی‌متر و با داشتن حجم خاک در ظرف (قطر ۲۵/۵ و ارتفاع ۸ سانتی‌متر) و چگالی تر ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و درصد رطوبت وزنی بر پایه خشک مورد نظر (۱۷/۱ و ۲۰/۹٪)، مقدار خاک و آب مورد نیاز محاسبه گردید. خاک مرطوب با افشان کردن آب به‌طور یکنواخت تهیه گردید. به این صورت که مقدار آب لازم بعد از محاسبه به خاک توسط یک آب‌پاش به صورت افشان پاشیده شد و خاک به مدت ۴۵ دقیقه ورز داده شد. سپس خاک مرطوب به صورت لایه لایه (سه لایه ۲/۷ سانتی‌متری) در ظرف ریخته شد تا فشردگی یکنواختی با عمق نمونه بدست آید. در هر لایه با ضربه‌های آهسته خاک فشرده گردید و چگالی ظاهری تر خاک به مقدار ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسانده شد؛ سعی گردید تغییرات چگالی ظاهری تر با عمق ظرف به حداقل برسد. قبل از اضافه کردن لایه جدید شیارهایی در سطح لایه قبلی ایجاد شد.

جدول ۱- برخی خصوصیات کودهای آلی مورد استفاده

ویژگی	واحد	کود گاوی	کمپوست	لجن فاضلاب
pH	-	۸/۶	۷/۸	۶/۴
هدایت الکتریکی	dS/m	۱۷	۱۴/۷	۹/۴
ماده آلی	%db	۴۳	۲۷	۳۱

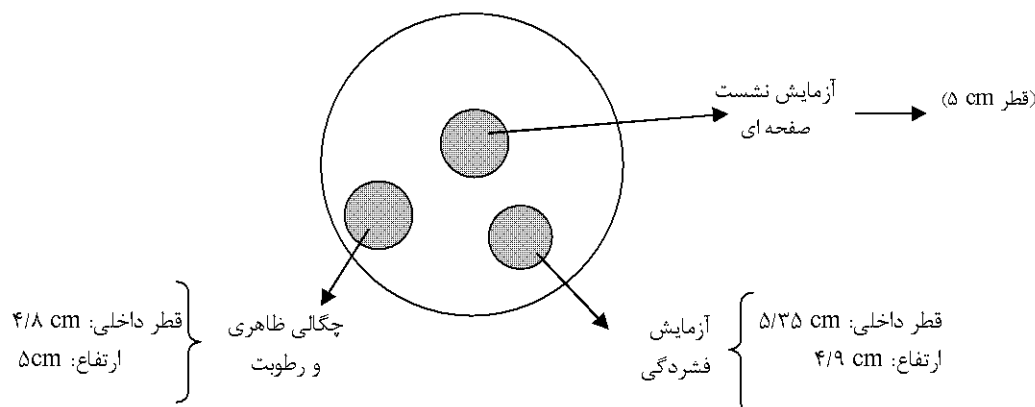
### روش پیش‌بارگذاری

خاک در ظرف آزمایش به وسیله دستگاه CBR (California Bearing Ratio) تحت پیش‌باری معادل ۱۰۰ کیلو پاسکال قرار گرفت. برای این منظور صفحه سوراخ‌داری به قطر ۲۵ سانتی‌متر بر روی سطح خاک ظرف قرار داده شد و توسط پیستون دستگاه

s و e به ترتیب مقدار نشست بر حسب میلی متر و کرنش می باشد. a, b, c, f, g و a', b', c', f', g' به ترتیب پارامترهای برازش شده برای معادلات (۱) و (۲) می باشند.

$$s = a(\log \sigma)^4 + b(\log \sigma)^3 + c(\log \sigma)^2 + f(\log \sigma) + g \quad (1)$$

$$e = a'(\log \sigma)^4 + b'(\log \sigma)^3 + c'(\log \sigma)^2 + f'(\log \sigma) + g' \quad (2)$$



شکل ۳- نمای بالای ظرف اصلی آزمایش و مکان آزمایش نشست صفحه ای (PST) و تهیه نمونه جهت آزمایش فشردگی محصور (CCT) و چگالی ظاهری و رطوبت خاک.

تنش پیش تراکمی به روش کاساگراند، از تقاطع امتداد منحنی فشردگی بکر و نیمساز زاویه که بین خط افقی و خط مماس بر نقطه با انحنای بیشینه ساخته می شود، به دست می آید. اولین مرحله در روش کاساگراند، تعریف دقیق خط فشردگی بکر می باشد. قدر مطلق شیب خط فشردگی بکر بیانگر شاخص فشردگی (C<sub>e</sub>) می باشد. برای منحنی حاصل از آزمایش PST، منحنی فشردگی بکر را با کمک رابطه رگرسیون خطی گذرا از سه داده آخر منحنی فشردگی تعیین گردید. Imhoff et al (2004) نیز به این شیوه خط فشردگی بکر را تعریف کردند. برای منحنی حاصل از آزمایش CCT، شاخص فشردگی به صورت قدر مطلق شیب در نقطه عطف تخمین گردید. امتداد منحنی فشردگی بکر بصورت خطی با این شیب و گذرنده از این نقطه تعیین گردید. این نقطه مقدار بیشینه شیب را بر روی منحنی داشته و خطی ترین بخش منحنی را نشان می دهد. این روش همچنین توسط Baumgartl and Kock (2004) نیز استفاده شده است.

همان گونه که ذکر شد، برای تعیین تنش پیش تراکمی، محاسبه نقطه انحنای بیشینه مورد نیاز است. بنابراین، مرحله دوم در محاسبه تنش پیش تراکمی به روش کاساگراند، دستیابی به تابع انحناء یعنی k (معادله ۳) است:

$$k = \frac{d^2 e / d(\log \sigma)^2}{[1 + (de / d(\log \sigma))^2]^{3/2}} \quad (3)$$

سپس اولین بیشینه موضعی از مقدار مطلق k محاسبه می شود. این بیشینه به روش عددی با استفاده از روش نیوتن برای پیدا کردن ریشه اول معادله (۴) محاسبه می گردد (Gregory et al., 2006).

$$\frac{dk}{d \log \sigma} = 0 \quad (4)$$

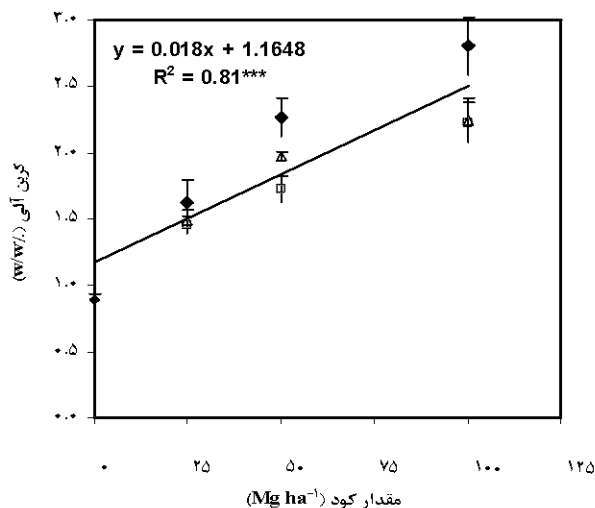
سپس مماس، خط افقی و نیمساز در نقطه انحنای بیشینه رسم گردید و نقطه حاصل از برخورد خط فشردگی بکر و نیمساز زاویه بین مماس در نقطه انحنای بیشینه و خط افق، به عنوان تنش پیش تراکمی معرفی می گردد (Gregory et al., 2006). لازم به ذکر است تمامی مراحل ذکر شده در بالا توسط برنامه نویسی در نرم افزار MatLab انجام شد.

برای بررسی اثر عوامل آزمایش بر پارامترهای اندازه گیری شده از ترکیب دو طرح آماری: ۱- طرح فاکتوریل ۳×۳×۳ (مقدار کود × نوع کود × رطوبت) و ۲- مقایسه گروهی (۱- کود شیمیایی در دو رطوبت، ۲- شاهد در دو رطوبت، ۳- شاهد با کودهای شیمیایی و ۴- شاهد و کودهای شیمیایی در مقابل بخش فاکتوریل) در قالب بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار استفاده گردید. برای تجزیه و تحلیل آماری داده ها از نرم افزار آماری SAS استفاده شد (SAS, 2001). در صورت معنی دار بودن اثر هر عامل آزمایش، میانگین ها در سطح احتمال ۵٪ و با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی دار (LSD) مقایسه شدند. در صورت معنی دار بودن اثر متقابل، مقایسه میانگین های آثار متقابل، از نرم افزار آماری MSTATC استفاده گردید.

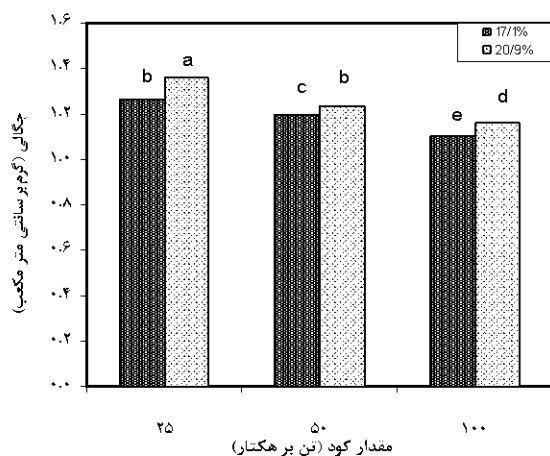
### نتایج و بحث

با توجه به این که رابطه خطی و معنی داری بین کربن آلی و مقدار کود اضافه شده به خاک برای کلیه انواع کودها وجود داشت (شکل ۴)، بنابراین تغییرات چگالی ظاهری و خواص فشردگی خاک نسبت به کربن آلی خاک که مشخصه معمول تر و مناسب تری می باشد، بیان خواهد شد.

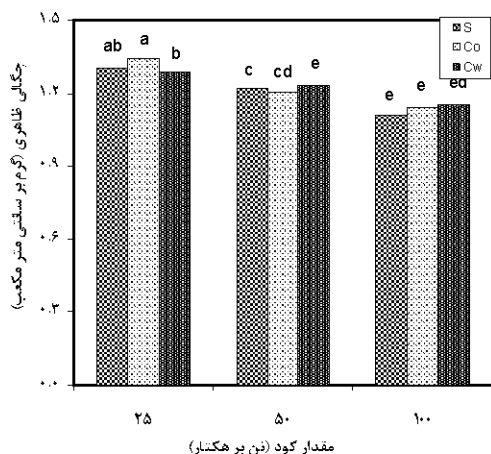
### چگالی ظاهری خاک



شکل ۵ - تغییرات چگالی ظاهری با کربن آلی در دو سطح رطوبتی. میله‌های عمودی نشانگر  $\pm$  یک خطای معیار می‌باشد.



شکل ۶ - اثر متقابل مقدار کود و رطوبت بر چگالی ظاهری خاک. ستون‌هایی که حرف مشابه ندارند، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD هستند.

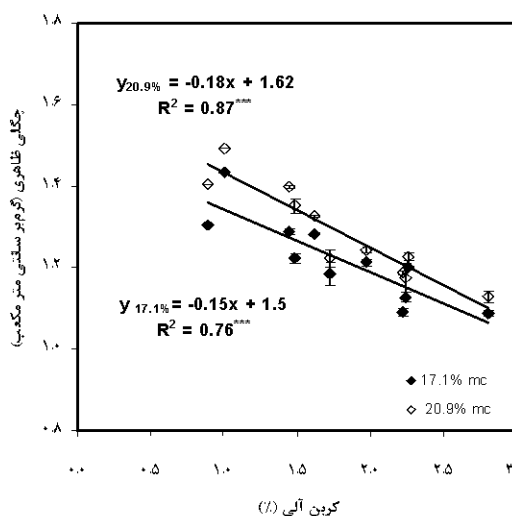


شکل ۷ - اثر متقابل مقدار و نوع کود بر چگالی ظاهری خاک. ستون‌هایی که حرف مشابه ندارند، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشند. (S=لجن، Co=کمپوست و CW=کود گاوی).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر مقدار کود و رطوبت بر چگالی ظاهری خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود، در حالی‌که اثر نوع کود بر این پارامتر معنی‌دار نبود. با افزایش مقدار کود داده شده به خاک، چگالی ظاهری خاک پس از پیش بار گذاری کاهش یافت. همچنین با افزایش رطوبت وزنی از ۱۷/۱ به ۲۰/۹ درصد، چگالی ظاهری خاک در کلیه تیمارها افزایش یافت (جدول ۲). بیشترین مقدار چگالی ظاهری خاک (۱/۴۹ گرم بر سانتی متر مکعب) مربوط به تیمار کود شیمیایی و در رطوبت وزنی ۲۰/۹ درصد و کمترین مقدار در تیمارهای کمپوست و لجن فاضلاب ۱۰۰ تن در هکتار و در رطوبت ۱۷/۱ درصد (۱/۰۹ گرم بر سانتی متر مکعب) مشاهده گردید (جدول‌های ۳ و ۴).

در هر سطح رطوبتی، یک رابطه معنی‌دار خطی و منفی بین درصد کربن آلی و چگالی ظاهری خاک وجود دارد (شکل ۵). گزارش شده است که وجود مواد آلی در خاک‌ها، چگالی را به دلیل فرایندهای متفاوت از قبیل رقیق سازی، خاکدانه‌سازی و الاستیسیته کاهش می‌دهد (Soane, 1990).

اثرهای متقابل دو گانه مقدار کود و رطوبت، و مقدار و نوع کود در سطح احتمال ۱ درصد بر چگالی ظاهری معنی‌دار بودند. با افزایش رطوبت از ۱۷/۱ به ۲۰/۹ درصد، چگالی ظاهری برای هر یک از مقادیر کود به‌طور معنی‌دار افزایش یافت (شکل ۶). با افزایش رطوبت از ۱۷/۱ به ۲۰/۹ درصد، بیشترین افزایش در چگالی ظاهری مربوط به مقدار ۲۵ تن کود در هکتار بود. در هر مقدار کود، با تغییر نوع کود چگالی ظاهری روند مشخصی را نشان نداد (شکل ۷). در مقدار ۱۰۰ تن در هکتار کود، تفاوت معنی‌داری در چگالی ظاهری انواع کود مشاهده نشد.



شکل ۸ - تغییرات کربن آلی خاک با مقدار کود. میله‌های عمودی نشانگر  $\pm$  یک خطای معیار می‌باشد. (S=لجن؛ Co=کمپوست؛ CW=کود گاوی؛ -Cشاهد).

## تنش پیش تراکمی

نتایج تجزیه واریانس، اثر معنی دار رطوبت در سطح احتمال ۰/۱ درصد و مقدار و نوع کود در سطح احتمال ۱ درصد بر تنش پیش تراکمی ( $\sigma_{pe}$ ) را نشان داد. تمامی اثرهای متقابل دوگانه و سه گانه بر  $\sigma_{pe}$  معنی دار نبودند. به عبارت دیگر پاسخ خاک به مقدار کود در انواع مختلف آن و در هر دو سطح رطوبتی مشابه بود.

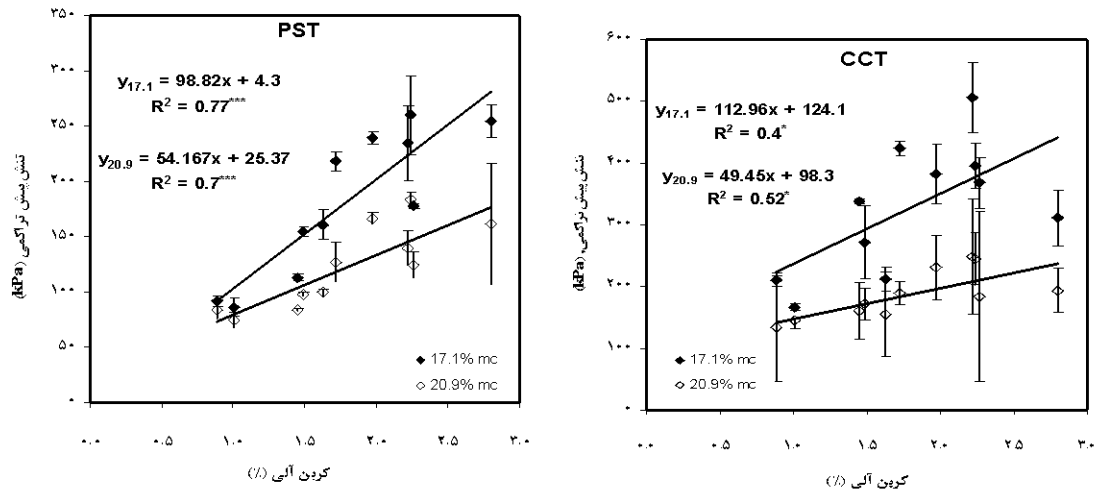
در آزمایش نشست صفحه‌ای (PST)، زمانی که رطوبت خاک از ۱۷/۱ به ۲۰/۹ درصد افزایش داده شد  $\sigma_{pe}$  باندازه ۳۴/۵٪ کاهش یافت. خاک‌های تیمار شده با کود گاوی و کمپوست به ترتیب بیشترین و کمترین  $\sigma_{pe}$  را داشته و مقدار برای لجن فاضلاب حدفاصل این دو قرار داشت. افزایش مقدار کود از ۲۵ به ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار،  $\sigma_{pe}$  را به ترتیب به اندازه ۴۹ و ۷۵ درصد افزایش داد (جدول ۲). در هر دو سطح رطوبتی، اختلاف معنی داری بین  $\sigma_{pe}$  خاکی که به آن کود شیمیایی اضافه شد و شاهد (بدون کود) وجود نداشت (جدول های ۳ و ۴). در رطوبت ۱۷/۱ درصد، تفاوت معنی داری بین  $\sigma_{pe}$  تیمار ۲۵ تن کمپوست در هکتار و شاهد وجود نداشت (جدول ۳)، در حالی که در رطوبت ۲۰/۹٪، تفاوت معنی داری بین  $\sigma_{pe}$  تیمارهایی که به آن‌ها ۲۵ تن کود آلی از منابع مختلف اضافه شده بود و تیمار شاهد مشاهده نشد (جدول ۴).

در آزمایش فشردگی محصور (CCT)، تغییرات  $\sigma_{pe}$  با رطوبت، نوع کود و مقدار کود مشابه آزمایش نشست صفحه‌ای بود. افزایش رطوبت خاک از ۱۷/۱ به ۲۰/۹ درصد، موجب شد که  $\sigma_{pe}$  باندازه ۳۴/۵٪ کاهش یابد. کمپوست و لجن فاضلاب به ترتیب بیشترین و کمترین  $\sigma_{pe}$  را داشتند و کود گاوی حد فاصل این دو را داشت. افزایش مقدار کود از ۲۵ به ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار،  $\sigma_{pe}$  را به ترتیب به اندازه ۳۵ و ۶۰ درصد افزایش داد (جدول ۲). در هر دو سطح رطوبتی، تفاوت معنی داری بین  $\sigma_{pe}$  تیمارهایی که به آن‌ها ۲۵ تن کود آلی از منابع مختلف اضافه شده بود و یا به آن کود شیمیایی اضافه شد با تیمار شاهد مشاهده نشد.

تنش پیش تراکمی خاک با کرن آلی رابطه خطی و معنی داری در هر دو سطح رطوبتی داشت (شکل ۸). با افزایش درصد کرن آلی خاک، چگالی ظاهری کاهش (شکل ۵) و حجم منافذ افزایش و اندازه آن‌ها کاهش می‌یابد و موجب می‌شود که آب خاک در حجم بیشتری از منافذ کوچکتر توزیع گردد و منجر به کاهش پتانسیل ماتریک در یک سطح رطوبت معین می‌شود. به عبارت دیگر، خاک با درصد کرن آلی بیشتر ولی در یک سطح رطوبت معین، نه تنها مقدار آب در منافذ بلکه ضخامت غشاء آبی اطراف ذرات خاک را نیز کاهش می‌دهد و موجب افزایش نیروی غشاء آبی بین ذرات و تنش موثر می‌شود.

همچون که غشاء آبی ذرات را به هم نزدیک می‌کند و نقاط تماس بین آنها افزایش پیدا می‌کند. افزایش در تنش موثر و نقاط تماس منجر به  $\sigma_{pe}$  بیشتری می‌شود. Mosaddeghi et al. (2006) گزارش نمودند که برای خاک سطحی در همین مزرعه،  $\sigma_{pe}$  خاک به‌طور خطی با تنش موثر حاصل از مکش ماتریک افزایش یافت. Ajayi et al. (2009) نیز نشان دادند که  $\sigma_{pe}$  خاک به‌طور خطی با مکش ماتریک افزایش می‌یابد. Zhang and Hartge (1990) معتقدند که افزایش قدرت نگه‌داری آب در یک پتانسیل ماتریک مشخص با اضافه کردن ماده آلی به خاک سبب افزایش تنش موثر می‌شود؛ چرا که ضریب  $\lambda$  (نسبتی از سطح مقطع خاک که توسط آب اشغال شده) در معادله تنش موثر را افزایش می‌دهد. آن‌ها یک مدل طرحواره ای جهت بیان این موضوع ارائه کردند که ذرات آلی در نقاط تماس قرار گرفته و سبب افزایش  $\lambda$  می‌شوند. بنابراین، اگرچه پیش بار (تنش خارجی) وارده بر نمونه‌ها ۱۰۰ کیلو پاسکال بود و در نتیجه انتظار می‌رفت  $\sigma_{pe}$  مشاهده شده در تیمارها نیز این مقدار باشد، اما به دلیل وجود ماده آلی در خاک، تنش موثر به علت مکش ماتریک افزایش یافته و در اکثر موارد تنش پیش تراکمی ظاهری (حاصل از بار خارجی وارده و تنش‌های داخلی خاک) بیشتر از پیش بار خارجی وارده بر نمونه‌ها به‌دست آمد. نظر باینکه برای توصیه جلوگیری از تراکم در حین تردد تراکتور و سایر ماشین‌های کشاورزی می‌توان شرایط خاک را بر حسب رطوبت و نه مکش ماتریک بیان نمود، لذا بیان تنش پیش تراکمی ظاهری (تنش در آستانه تراکم) بر حسب رطوبت خاک شاید کاربردی تر باشد. از طرف دیگر، Imhoff et al. (2004) گزارش نمودند که کرن آلی اثر معنی داری بر  $\sigma_{pe}$  خاک ندارد. آنها روی نمونه‌های دست نخورده که در یک مکش رطوبتی معین تهیه شده بودند و آزمایش تک محوری (ادومتری) انجام دادند. در صورتی که در این تحقیق آزمایش‌های PST و CCT روی نمونه‌های بازسازی شده که در یک رطوبت معین تهیه شده بودند ولی در مکش رطوبتی متفاوت قرار داشتند، انجام گرفت.

با افزایش رطوبت وزنی از ۱۷/۱ به ۲۰/۹ درصد،  $\sigma_{pe}$  کاهش یافت (شکل ۸). این نتیجه با تحقیقات Keller and Arvidsson (2007) همخوانی دارد. Saffih-Hdad et al. (2009) که روی نمونه‌های بازسازی شده خاک‌های سطحی با بافت‌های مختلف کار می‌کردند رابطه منفی بین  $\sigma_{pe}$  و رطوبت اولیه خاک گزارش نمودند. یک رابطه منفی و معنی داری نیز توسط Alexandrou and Earl (1995)، Imhoff et al. (2004) و Mosaddeghi et al. (2006) مشاهده شد. بنابراین، تاثیر ماده آلی بر تراکم‌پذیری خاک بستگی به رطوبت خاک در زمان اعمال بار دارد (Soane, 1990).



شکل ۸ - تغییرات تنش پیش تراکمی با کربن آلی در دو سطح رطوبتی: الف) آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) و ب) آزمایش فشردگی محصور (CCT). میله‌های عمودی نشانگر  $\pm$  یک خطای معیار می‌باشد.

جدول ۲ - مقایسه میانگین<sup>+</sup> صفات اندازه‌گیری شده

آزمایش CCT		آزمایش PST		چگالی	عوامل آزمایش
شاخص فشردگی	تنش پیش تراکمی (kPa)	شاخص فشردگی	تنش پیش تراکمی (kPa)	ظاهری خشک (Mg m <sup>-3</sup> )	
					رطوبت (درصد وزنی)
۰/۲۰ <sup>a</sup>	۳۵۶/۵ <sup>a</sup>	۱۵/۶ <sup>a</sup>	۲۰/۱۶ <sup>a</sup>	۱/۱۸ <sup>b</sup>	۱۷/۱
۰/۱۶ <sup>b</sup>	۲۲۰/۳ <sup>b</sup>	۱۴/۲ <sup>b</sup>	۱۳۲ <sup>b</sup>	۱/۲۵ <sup>a</sup>	۲۰/۹
					نوع کود
۰/۱۸ <sup>a</sup>	۲۳۸/۱ <sup>b</sup>	۱۵/۴ <sup>a</sup>	۱۶۳/۳ <sup>ab</sup>	۱/۲۱ <sup>a</sup>	لجن فاضلاب
۰/۱۸ <sup>a</sup>	۳۴۴/۴ <sup>a</sup>	۱۴/۵ <sup>a</sup>	۱۵۳/۳ <sup>b</sup>	۱/۲۳ <sup>a</sup>	کمپوست
۰/۱۸ <sup>a</sup>	۲۸۲/۴ <sup>ab</sup>	۱۴/۹ <sup>a</sup>	۱۸۳/۹ <sup>a</sup>	۱/۲۲ <sup>a</sup>	کود گاوی
					مقدار کود (تن در هکتار)
۰/۱۷ <sup>b</sup>	۲۱۸/۹ <sup>b</sup>	۱۶/۱ <sup>a</sup>	۱۱۸/۳ <sup>c</sup>	۱/۳۱ <sup>a</sup>	۲۵
۰/۱۹ <sup>a</sup>	۲۹۶/۳ <sup>a</sup>	۱۶/۳ <sup>a</sup>	۱۷۶/۱ <sup>b</sup>	۱/۲۲ <sup>b</sup>	۵۰
۰/۱۸ <sup>a</sup>	۳۴۹/۸ <sup>a</sup>	۱۲/۴ <sup>b</sup>	۲۰۶ <sup>a</sup>	۱/۱۳ <sup>c</sup>	۱۰۰

\* میانگین های عامل آزمایشی در هر ستون که حرف مشابه ندارند، دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشند.

خوردگی خاک در حین نمونه گیری در روش CCT و شرایط مرزی متفاوت در این دو روش نسبت دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که برای تخمین  $\sigma_{pe}$  روش PST بهتر از روش CCT است. Hemmat et al. (2009) روی نمونه‌های بازسازی شده یک خاک لومی شنی آزمایش نمودند و مقادیر بالاتری را نیز برای  $\sigma_{pe}$  در روش CCT نسبت به روش PST گزارش کردند. علت این تفاوت را می‌توان امکان تغییر شکل جانبی خاک علاوه بر تغییر شکل عمودی در زیر صفحه بارگذاری در آزمایش PST ذکر کرد (Keller et al., 2004; Dawidowski et al., 2001). در حالی که تغییر شکل خاک در آزمایش CCT اساساً عمودی بوده و اصطکاک بین خاک و دیواره داخلی سیلندر متفاوت از اصطکاک داخلی بین ذرات خاک در سیلندر فرضی در زیر صفحه بارگذاری در روش PST می‌باشد. افزایش سریع در فشار آب متفدی در نمونه، و با توجه به غیر قابل تراکم بودن آب، منجر به افزایش

یک رابطه خطی و معنی داری ( $P < 0.1$ ) بین مقادیر  $\sigma_{pe}$  تخمین زده شده با دو آزمایش PST و CCT وجود دارد (شکل ۹)، هرچند مقادیر تنش پیش تراکمی به دست آمده از آزمایش CCT حدود ۲ برابر مقادیر در آزمایش PST می‌باشد. این نتایج با نتایج Tahmasebi et al. (2008) همخوانی دارد. Dawidowski et al. (2001) با اعمال پیش باری مشخص بر خاک در یک صندوق خاک و بارگذاری مجدد توسط دو روش PST و CCT به ارزیابی دو طریقه بارگذاری مذکور در تخمین  $\sigma_{pe}$  پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که مقادیر  $\sigma_{pe}$  تخمینی در روش PST بالاتر از روش CCT است، اما این تفاوت معنی دار نبود. از طرف دیگر، Mosaddeghi et al. (2006) در مطالعات فشردگی پذیری خاک در مزرعه با دو روش PST و CCT گزارش کردند که مقدار  $\sigma_{pe}$  اندازه گیری شده توسط روش PST بیشتر از روش CCT بود. آن‌ها این موضوع را به بهم



در شکل (۱۰) تاثیر اثرهای متقابل رطوبت و نوع کود و رطوبت و مقدار کود بر میانگین شاخص فشردگی مربوط به آزمایش CCT نشان داده شده است. با افزایش رطوبت از ۱۷/۱ به ۲۰/۹ درصد، شاخص فشردگی در هر یک از انواع کودها به طور معنی داری کاهش یافت؛ ضمن این که در هر سطح رطوبتی تفاوت معنی داری بین انواع کود دیده نشد (شکل ۱۱- الف). بنابراین، کاهش تقریباً ثابتی با افزایش رطوبت در شاخص فشردگی در تمامی کودهای آلی مشاهده گردید. با افزایش رطوبت از ۱۷/۱ به ۲۰/۹ درصد، شاخص فشردگی در هر یک از مقادیر کودی به طور معنی داری کاهش یافت (شکل ۱۰- ب). روند کاهش شاخص فشردگی با افزایش رطوبت در انواع مختلف کودی متفاوت بود. بیشترین کاهش با افزایش رطوبت در مقدار ۱۰۰ تن کود در هکتار و کمترین کاهش در مقدار ۵۰ تن کود در هکتار مشاهده گردید (شکل ۱۰- ب).

زمانی که رابطه نوع و مقدار کود و شاخص فشردگی (جدول های ۳ و ۴) بررسی شد روند خاصی ملاحظه نشد، ولی وقتی که رابطه بین کربن آلی خاک و شاخص فشردگی مطالعه شد (شکل ۱۱)، رابطه خطی منفی و معنی داری بین شاخص فشردگی و کربن آلی در رطوبت ۲۰/۹ درصد و در هر دو آزمایش PST و CCT مشاهده شد؛ در حالی که در رطوبت ۱۷/۱ درصد این رابطه معنی دار نبود. قابل ذکر است که در آزمایش CCT و در رطوبت ۲۰/۹ درصد، داده‌های مربوط به تیمار کود شیمیایی (جدول ۴) پرت بود، لذا در به دست آوردن معادله رگرسیون، این داده‌ها حذف شد.

Zhang et al. (1997) بیان می‌کنند که اگرچه Soane

(1990) معتقد است که اثر ماده آلی در کاهش حساسیت خاک به تراکم احتمالاً در رطوبت‌های زیاد بیشتر است، ولی تحقیقات کمی وجود دارد که این فرضیه را اثبات کند. نتایج این تحقیق موید این نظریه بود. علت این امر را می‌توان الاستیسیته بالاتر مواد آلی در رطوبت‌های بالاتر دانست (Soane, 1990). از طرف دیگر، Imhoff, et al. (2004) که روی خواص فشردگی نمونه‌های خاک دست نخورده سری هاپ لودکس (Hapludox) کار می‌کردند، هیچگونه رابطه‌ای بین شاخص فشردگی و پتانسیل اولیه یا رطوبت اولیه خاک پیدا نکردند.

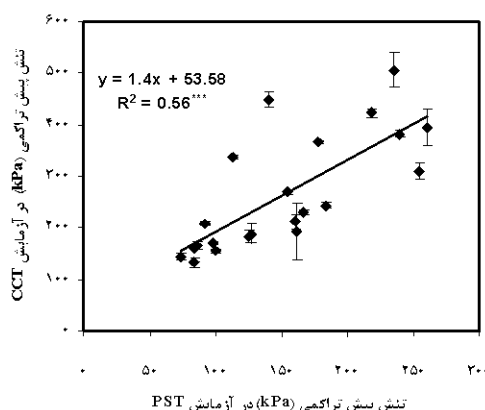
### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر افزایش دراز-مدت کودهای آلی از منابع مختلف و با نرخ‌های متفاوت به یک خاک با بافت لوم رسی سیلتی، بر چگالی ظاهری و خواص فشردگی (تنش پیش تراکمی و شاخص فشردگی) آن مطالعه گردید. با افزایش کربن آلی، چگالی

تنش اعمالی در آزمایش CCT می‌گردد (Keller et al., 2004). بنابراین، با توجه به مقدار پیش‌باری که به نمونه‌ها اعمال شد، به نظر می‌رسد نتایج حاصل از آزمایش PST به واقعیت نزدیک‌تر باشند.

### شاخص فشردگی

شاخص فشردگی بیانگر افزایش در نشست (یا کرنش) خاک به ازاء واحد افزایش در لگاریتم تنش اعمالی است (Gregory et al., 2006; Imhoff et al., 2004). این به عنوان مقیاسی از حساسیت خاک به تراکم می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در هر دو نوع آزمایش، اثر مقدار کود بر شاخص فشردگی معنی دار بود، ولی اثر نوع کود بر این شاخص معنی دار نبود. اثر رطوبت بر این شاخص نیز معنی دار بود. تمامی اثرهای متقابل دوگانه و سه‌گانه بر شاخص فشردگی در آزمایش PST معنی دار نبود. به عبارت دیگر پاسخ خاک به مقدار کود در انواع مختلف آن و در هر دو سطح رطوبتی مشابه بود. در حالی که اثرهای متقابل رطوبت و مقدار کود، و رطوبت و نوع کود بر شاخص فشردگی در آزمایش CCT در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود.



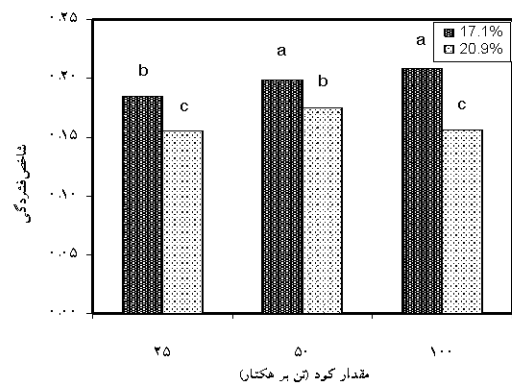
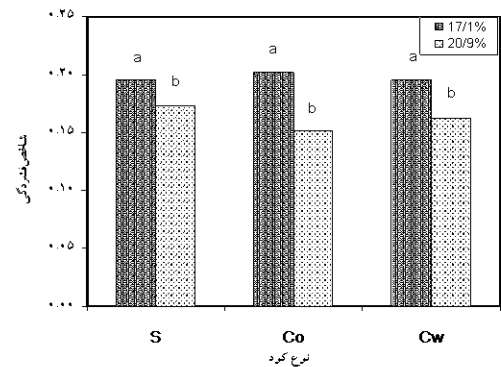
شکل ۹ - رابطه بین تنش پیش‌تراکمی به دست آمده از آزمایش‌های آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) و آزمایش فشردگی محصور (CCT). میله‌های عمودی نشانگر  $\pm$  یک خطای معیار می‌باشد.

در آزمایش PST و در رطوبت ۱۷/۱ درصد، مقادیر شاخص فشردگی در تیمارهای ۱۰۰ تن لیجن فاضلاب، ۵۰ و ۱۰۰ تن کمپوست و ۱۰۰ کود گاوی در هکتار با تیمار شاهد تفاوت معنی داری نداشت، ولی در سایر تیمارهای کود آلی این شاخص بطور معنی داری افزایش و در تیمار کود شیمیایی بطور معنی داری کاهش یافت (جدول ۳). در رطوبت ۲۰/۹٪، مقادیر شاخص فشردگی در تیمارهای کود آلی با تیمار شاهد تفاوت معنی داری نداشت، فقط در تیمارهای ۲۵ تن کود گاوی در هکتار و کود شیمیایی افزایش معنی داری نسبت به شاهد مشاهده شد (جدول ۴).

تنش پیش تراکمی در آزمایش‌های PST و CCT وجود داشت؛ اما مقادیر حاصله از آزمایش PST به واقعیت نزدیک‌ترند. شاخص فشردگی در رطوبت ۱۷/۱ درصد رابطه ای معنی‌داری با کربن آلی نشان نداد، ولی در رطوبت ۲۰/۹ درصد شاخص فشردگی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. با افزایش کربن آلی، تنش پیش تراکمی ظاهری افزایش ولی چگالی ظاهری خاک کاهش یافت. بنابراین، برای خاک‌ها با مقدار کربن آلی مختلف، چگالی ظاهری نمی‌تواند شاخص مناسب جهت تعیین تراکم-پذیری خاک باشد. با افزایش کربن آلی خاک تنش پیش تراکمی ظاهری افزایش می‌یابد به عبارت دیگر تراکتورها و ادوات کشاورزی با بار بیشتر بدون ایجاد تراکم زیادی می‌توانند در مزرعه رفت و آمد کنند. همچنین با افزایش کربن آلی، شاخص فشردگی در رطوبت‌های زیاد کاهش می‌یابد، بنابراین کشاورزان می‌توانند عملیات مکانیزه را در رطوبت بالاتر اما با خطر کمتر ایجاد تراکم (تغییر شکل ماندگار) در خاک، انجام دهند. اثر مقادیر کود بر خواص فشردگی خاک در انواع کود آلی تقریباً مشابه بود. بنابراین، منابع کودآلی در هر منطقه با توجه به در دسترس بودن، ارزان بودن و اثر منفی (از نظر تجمع عناصر سنگین) نداشتن، می‌توانند کشاورزان را جهت مدیریت تراکم خاک یاری رسانند. نتایج این تحقیق با استفاده از نمونه های خاک بازسازی شده به دست آمد، توصیه می‌شود این آزمایش‌ها روی نمونه‌های دست نخورده نیز انجام شود.)

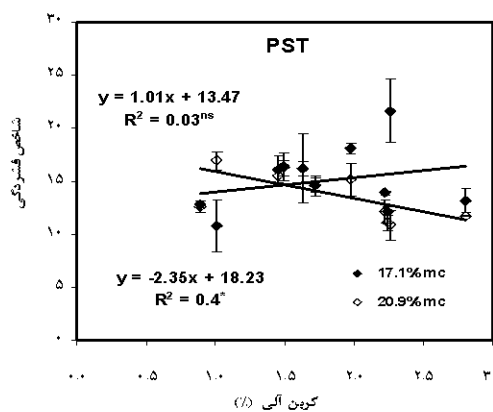
### سپاسگزاری

اعتبارات این پژوهش از طریق طرح تحقیقاتی با کد ۸۷۰۴۰۲۰۸ با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران کشور و دانشگاه صنعتی اصفهان تامین شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

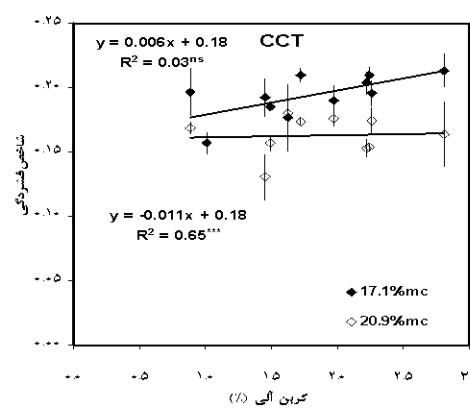


شکل ۱۰- اثر متقابل الف) رطوبت و نوع کود و ب) رطوبت و مقدار کود بر شاخص فشردگی در آزمایش CCT. (S=لجن، Co=کمپوست و Cw=کود گاوی). اعداد ستون‌ها که حرف مشابه ندارند، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD دارند.

ظاهری خاک پس از فشردگی نسبت به تیمار شاهد (بدون کود) در دو سطح رطوبتی (۱۷/۱ و ۲۰/۹ درصد)، کاهش یافت. با افزایش رطوبت، چگالی ظاهری خاک بیشتر شد. با افزایش کودآلی در مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار، تنش پیش تراکمی خاک ۱ تا ۳ و ۱ تا ۳/۵ برابر نسبت به تیمار شاهد به ترتیب در آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT) افزایش نشان داد. رابطه خطی مثبت و معنی‌داری بین



(ب)



(الف)

۱۱- تغییرات شاخص فشردگی با کربن آلی در دو سطح رطوبتی: الف) آزمایش نشست صفحه‌ای ب) آزمایش فشردگی محصور. میله‌های عمودی نشانگر  $\pm$  یک خطای معیار می‌باشد.

جدول ۳ - مقایسه میانگین\* صفات اندازه‌گیری شده در رطوبت ۱۷/۱٪

آزمایش CCT		آزمایش PST		چگالی ظاهری	تیمار کودی
شاخص فشردگی	تنش پیش‌تراکمی (kPa)	شاخص فشردگی	تنش پیش‌تراکمی (kPa)	خشک (Mg m <sup>-3</sup> )	(تن در هکتار)
۰/۱۶ <sup>efg</sup>	۲۱۲/۱ <sup>efg</sup>	۱۶/۲ <sup>bedc</sup>	۱۶۰/۸ <sup>dc</sup>	۱/۲۸ <sup>e</sup>	لجن فاضلاب ۲۵
۰/۲ <sup>bac</sup>	۳۶۸ <sup>ebdac</sup>	۲۰/۲ <sup>a</sup>	۱۷۸/۱ <sup>bc</sup>	۱/۲۰ <sup>gih</sup>	لجن فاضلاب ۵۰
۰/۲۱ <sup>a</sup>	۳۱۱/۱ <sup>ebdfcg</sup>	۱۳/۱ <sup>ficdh</sup>	۲۵۴/۷ <sup>a</sup>	۱/۰۹ <sup>k</sup>	لجن فاضلاب ۱۰۰
۰/۱۹ <sup>bdac</sup>	۳۳۸/۲ <sup>ebdfc</sup>	۱۶/۳ <sup>bdc</sup>	۱۱۳/۰ <sup>hfge</sup>	۱/۲۸ <sup>e</sup>	کمپوست ۲۵
۰/۲۱ <sup>a</sup>	۴۲۳/۶ <sup>bac</sup>	۱۴/۶ <sup>bedheg</sup>	۲۱۸/۵ <sup>ba</sup>	۱/۱۸ <sup>ih</sup>	کمپوست ۵۰
۰/۲۰ <sup>ba</sup>	۵۰۶/۵ <sup>a</sup>	۱۳/۹ <sup>fedheg</sup>	۲۳۵/۲ <sup>a</sup>	۱/۰۹ <sup>k</sup>	کمپوست ۱۰۰
۰/۱۸ <sup>ebdac</sup>	۲۷۱/۲ <sup>ehdfcg</sup>	۱۶/۳ <sup>bdc</sup>	۱۵۴/۳ <sup>dec</sup>	۱/۲۲ <sup>gfh</sup>	گاوی ۲۵
۰/۱۹ <sup>ebdac</sup>	۳۸۲ <sup>ebdac</sup>	۱۸/۱ <sup>ba</sup>	۲۳۹/۸ <sup>a</sup>	۱/۲۱ <sup>gfh</sup>	گاوی ۵۰
۰/۲۱ <sup>a</sup>	۳۹۵/۴ <sup>bdac</sup>	۱۲/۲ <sup>fihi</sup>	۲۶۰/۱ <sup>a</sup>	۱/۱۳ <sup>j</sup>	گاوی ۱۰۰
۰/۱۶ <sup>efg</sup>	۱۶۵/۸ <sup>hg</sup>	۱۰/۸ <sup>i</sup>	۸۵/۸ <sup>hg</sup>	۱/۴۳ <sup>b</sup>	کود شیمیایی
۰/۲۰ <sup>ba</sup>	۲۰۹/۴ <sup>hfg</sup>	۱۲/۸ <sup>h</sup>	۹۱/۹ <sup>hg</sup>	۱/۳۰ <sup>ed</sup>	شاهد

\* میانگین‌ها در هر ستون که حرف مشابه ندارند، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشند.

جدول ۴ - مقایسه میانگین\* صفات اندازه‌گیری شده در رطوبت ۲۰/۹٪

آزمایش CCT		آزمایش PST		ظاهری	چگالی خشک	تیمار کودی
شاخص فشردگی	تنش پیش‌تراکمی (kPa)	شاخص فشردگی	تنش پیش‌تراکمی (kPa)		(Mg m <sup>-3</sup> )	(تن در هکتار)
۰/۱۸ <sup>ebdgcfl</sup>	۱۶۰/۴ <sup>hg</sup>	۱۶/۲ <sup>bedc</sup>	۹۹/۸ <sup>hfg</sup>		۱/۳۳ <sup>cd</sup>	لجن فاضلاب ۲۵
۰/۱۷ <sup>edgcfl</sup>	۱۸۳/۵ <sup>hg</sup>	۱۵/۱ <sup>fbdecg</sup>	۱۲۴/۸ <sup>dfge</sup>		۱/۲۴ <sup>gf</sup>	لجن فاضلاب ۵۰
۰/۱۶ <sup>efg</sup>	۱۹۳/۳ <sup>hfg</sup>	۱۱/۷ <sup>ih</sup>	۱۶۱/۷ <sup>dc</sup>		۱/۱۳ <sup>j</sup>	لجن فاضلاب ۱۰۰
۰/۱۳ <sup>h</sup>	۱۶۰/۴ <sup>hg</sup>	۱۵/۵ <sup>fbdec</sup>	۸۴ <sup>hg</sup>		۱/۳۹ <sup>b</sup>	کمپوست ۲۵
۰/۱۷ <sup>edgcfl</sup>	۱۸۹/۴ <sup>hfg</sup>	۱۴/۶ <sup>fbdecg</sup>	۱۲۸/۵ <sup>dfge</sup>	۱/۲۲	۱/۲۲ <sup>gfh</sup>	کمپوست ۵۰
۰/۱۵ <sup>hg</sup>	۴۴۸/۶ <sup>ba</sup>	۱۲/۲ <sup>fihi</sup>	۱۴۰ <sup>dfce</sup>		۱/۱۸ <sup>ih</sup>	کمپوست ۱۰۰
۰/۱۶ <sup>efg</sup>	۱۷۱/۴ <sup>hg</sup>	۱۶/۴ <sup>bdc</sup>	۹۸/۱ <sup>hfg</sup>		۱/۳۵ <sup>c</sup>	گاوی ۲۵
۰/۱۸ <sup>ebdgcfl</sup>	۲۳۰/۴ <sup>ehfg</sup>	۱۵/۲ <sup>fbdecg</sup>	۱۶۶/۸ <sup>dc</sup>		۱/۲۴ <sup>f</sup>	گاوی ۵۰
۰/۱۵ <sup>hg</sup>	۲۴۴/۲ <sup>ehdfg</sup>	۱۱/۲ <sup>ih</sup>	۱۸۴/۲ <sup>bc</sup>		۱/۱۷ <sup>i</sup>	گاوی ۱۰۰
۰/۰۴ <sup>i</sup>	۱۴۴/۸ <sup>h</sup>	۱۷ <sup>bac</sup>	۷۴/۱ <sup>h</sup>		۱/۴۹ <sup>a</sup>	کود شیمیایی
۰/۱۸ <sup>ebdgcfl</sup>	۱۳۳/۶ <sup>h</sup>	۱۲/۶ <sup>fihi</sup>	۸۳/۸ <sup>h</sup>		۱/۴۱ <sup>b</sup>	شاهد

\* میانگین‌ها در هر ستون که حرف مشابه ندارند، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشند.

## REFERENCES

- Ajayi, A. E., Dias Junior, M. S., Curi, N. Vasculous, C. A. I. and Araujo Junior, C. F. (2009). Strength attributes and compaction susceptibility in Brazilian Latosols. *Soil & Tillage Research*, 105, 122-127.
- Alexandrou, A. and Earl, R. (1995). In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61, 67-72.
- Baumgartl, T. and Kock, B. (2004). Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 57-65.
- Casagrande, A. (1936). Determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. III, Cambridge, June 22-26, 60-64.
- Cullery, J. L. B. (1993). Density and compressibility. In: Carter, M. R. (Ed.), *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers. Boca Raton, FL, USA.
- Dawidowski, J. B., Morrison, J. E. and Snieg, M. (2001). Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. *Translations of American Society of Agricultural Engineers*, 44, 1059-1064.
- Dawidowski, J. B. and Koolen, A. J. (1994). Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil & Tillage Research*, 31, 277-282.
- Dias Junior, M. S. (2000). Use of soil management history and moisture content as a tool to void soil

- compaction. In: IV Escuela Latinoamericana de Fdsica de Suelos, Mérida, Venezuele.
- Gregory, A. S., Whalley, W. R., Watts, C. W., Bird, N. R. A., Hallett, P. D. and Whitmore, A. P. (2006). Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil & Tillage Research*, 89, 45–57.
- Hamza, M. A. and Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82, 121–145.
- Hemmat, A., Tahmasebi, M., Vafaeian, M. and Mosaddeghi M. R. (2009). Relationship between pre-compaction stress and shear strength under confined and semi-confined loadings for a sandy loam soil. *Biosystems Engineering*, 102, 219–226.
- Imhoff, S., Silva, A. P. da and Fallow, D. (2004). Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 17–24.
- Johnson, C. E. and Bailey, A. C. (2002). Soil compaction. In: *Advances in soil dynamics*. Vol. 2. pp. 155-178. ASAE Publ.
- Keller, T. and Arvidsson, J. (2007). Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science*, 58, 1373–1381.
- Keller T., Arvidsson, J., Dawidowski, J. B. and Koolen, A. J. (2004). Soil recompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Research*, 77, 97–108.
- Koolen A. J. (1974). A method for soil compactibility determination. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 19, 271–278.
- Larson, W. E. and Gupta, S. C. (1980). Estimating critical stresses in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 1127–1132.
- Larson, W. E., Gupta, S. C. and Usech, R. A. (1980). Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 450–457.
- Lipiec, J., Ferrero, A., Giovanetti, V., Nosalewicz, A. and Turski, M. (2002). Response of structure to simulated trampling of wood land soil. *Advances in Geocology*, 35, 133–140.
- Mosaddeghi M. R., Hemmat, A., Hajabbasi, M. A., Vafaeian, M. and Alexandrou, A. (2006). Plate sinkage versus confined compression tests for in situ soil Compressibility Studies. *Biosystems Engineering*, 93, 325–334.
- Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A., Hemmat, A. and Afyuni, M. (2000). Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil & Tillage Research*, 55, 87–97.
- O’Sullivan, M. F. (1992). Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivation. *Soil & Tillage Research*, 24, 257–269.
- Rucknagel, J., Hofmann, B., Paul, R., Christen, O. and Hulsbergen, K. J. (2007). Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil & Tillage Research*, 92, 213–220.
- SAS. 2001. SAS Users’ guide, statistics. Version 8.2. *Statistical analysis system*, Inc., Raleigh, NC.
- Saffih-Hdadi, K., Défossez, P., Richard, G., Cui, Y. J., Tang, A. M. and Chaplain, V. (2009). A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil & Tillage Research*, 105, 96–103.
- Silva, R. B. Lancas, K. P., Miranda, E. E. V., Silva, F. A. M. and Baio, F. H. R. (2009). Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State - Brazil. *Soil & Tillage Research*, 103, 265–270.
- Soane, B. D. (1990). The role of organic matter in soil compatibility: A review of compaction some practical aspects. *Soil & Tillage Research*, 16, 179–201.
- Soane, B. D., Blackwell, P. S., Dickson, J. W. and Painter, D. J. (1981). Compaction under tyers and other running gear. *Soil & Tillage Research*, 1, 373–400.
- Stone, R. J. and Ekwue, E. I. (1995). Compressibility of some Trinidadian soils as affected by incorporation of peat. *Journal Agricultural Engineering Research*, 60, 15–24.
- Tahmasebi, M., Hemmat, A., vafaeian, M., and Mosaddeghi, M. R. (2008). Evaluation of compaction strength (precompaction stress) using plate sinkage and confined compression tests. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 44, 245–254. (In Farsi)
- Zhang, H. and Hartge, K. H. (1990). Cohesion in unaturated sandy soil and the influence of organic matter. *Soil Technology*, 3, 311–326 (in German with English summary).
- Zhang, H. and Hartge, K. H. (1995). Mechanical properties of soils as influenced by the incorporation of organic matter. In: Hartge, K. H. and Stewart, B. A. (Eds.), *Soil structure, its development and function*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Zhang, H., Hartge, K. H. and Ringe, H. (1997). Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 239–245.