

ارزیابی مقاومت تراکمی (تنش پیش-تراکمی) خاک با استفاده از آزمایش‌های نشت صفحه‌ای و فشردگی محصور

منا طهماسبی^{۱*}، عباس همت^۲، محمود وفاییان^۲ و محمد رضا مصدقی^۳

(تاریخ دریافت: ۸۵/۱۰/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۵/۹)

چکیده

برای جلوگیری از تراکم خاک، دانستن حد تنفس فشاری مجاز (مقاومت تراکمی) خاک حائز اهمیت می‌باشد. تنفس پیش-تراکمی (σ_{pc}) به عنوان معیاری از مقاومت به تراکم خاک و برای تعیین درجه تراکم پذیری خاک پیشنهاد شده است. در این پژوهش، σ_{pc} خاک با استفاده از آزمایش‌های نشت صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT) تعیین گردید. آزمایش‌ها روی نمونه‌هایی از یک خاک لوم-شنی انجام گرفت. برای تهیه نمونه‌های خاک با درجات مختلف تراکم، از دو سطح رطوبت (۱۷ و ۱۹ درصد وزنی خشک) و شش سطح تنفس پیش-باری (۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) استفاده شد. برای بررسی اثر رطوبت و تنفس پیش-باری بر σ_{pc} برآورده شده، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار استفاده شد. مقادیر σ_{pc} تعیین شده به طور معنی‌داری تحت تأثیر ترکیب بارگذاری و شرایط رطوبتی خاک قرار گرفت. نتایج آزمایش PST نشان داد که با افزایش مقدار تنفس پیش-باری و رطوبت خاک، میزان σ_{pc} به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. در صورتی که در آزمایش CCT با افزایش رطوبت خاک، σ_{pc} برآورده شده به طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که با آزمایش PST، مقاومت تراکمی خاک (σ_{pc}) با دقت تعیین شد، در صورتی که مقادیر تعیین شده با آزمایش CCT ۴/۵ (در رطوبت ۱۷٪) و ۸/۵ (در رطوبت ۱۷٪) برابر مقادیر تنفس پیش-باری اعمال شده به خاک بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که σ_{pc} بستگی به روش آزمایش فشاری داشته، آزمایش PST روشی مناسب برای برآورده مقاومت تراکمی (تنفس پیش-تراکمی) خاک بوده و در مدیریت پایدار خاک (از جنبه‌های ترددپذیری خاک و خاکورزی) و اثر عوامل مختلف مدیریتی بر تنفس پیش-تراکمی خاک قابل استفاده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، مقاومت خاک، تنفس پیش-تراکمی، آزمایش نشت صفحه‌ای، آزمایش فشردگی محصور

تراکم خاک مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (۱ و ۲۲).

مقدمه

فشردگی (Compression) به مفهوم فرایندی است که افزایش چگالی ظاهری را سبب می‌شود و ممکن است منشاء خارجی یا داخلی داشته باشد. در خاک‌های اشبع، فشردگی را

از جمله عوامل مهم تخریب فیزیکی خاک، تراکم خاک (Soil compaction) می‌باشد. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش اندازه مزارع و همچنین توان و وزن ماشین‌های کشاورزی،

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استاد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشیار مهندسی خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بولعلی سینا، همدان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: monatahmasebi@yahoo.com

خواهد شد (۱۱ و ۲۱).

هدف اصلی از ارزیابی σ_{pc} یک خاک، مطالعه ظرفیت باربری خاک در برابر تنش‌های وارد بر آن می‌باشد که به مدیریت مناسب و پایداری آن کمک می‌کند (۱۸ و ۱۹). روش‌های تعیین تنش‌پیش-تراکمی عبارت‌اند از: روش ادومتر (Oedometer) یا تحکیم سنج که به عنوان تنها روش اندازه‌گیری σ_{pc} در مهندسی عمران پیشنهاد شده است و بارگذاری در آن به صورت مرحله‌ای و با فواصل زمانی طولانی صورت می‌گیرد به‌طوری که تغییرات حجم نمونه مورد آزمایش با زمان اندک باشد. آزمایش فشردگی محصور (CCT) (Confined Compression Test) همان آزمایش تحکیم است با این تفاوت که در خاک غیراشع به کار می‌رود و آزمایش قبل از خروج آب از خاک خاتمه می‌باید (۱۸ و ۱۹). CCT توسط مهندسین کشاورزی و خاک‌شناسی به عنوان یک روش آسان و سریع برای تعیین تنش‌پیش-تراکمی و تراکم‌پذیری خاک‌ها استفاده شده است، ولی در برآورد رفتار واقعی خاک‌های طبیعی و در محل معمایی دارد. فشارهای جانبی اعمال شده به نمونه در این روش بیشتر از خاک مزرعه می‌باشد. هم‌چنین ایجاد خطای هنگام برداشت نمونه دست نخورده به‌دلیل تغییر شکل خاک و تغییرات حجم خاک به‌دلیل آماس قبل از آزمایش، از معایب دیگر این روش می‌باشد (۴ و ۵).

یکی از روش‌های بررسی تراکم‌پذیری و اندازه‌گیری ظرفیت باربری خاک که تا حدودی معضلات فوق را حل می‌کند، آزمایش نشست صفحه‌ای (Plate sinkage test) (PST) (Plate沉降試驗) می‌باشد. آزمایش نشست صفحه‌ای به‌طور وسیع در هر دو رشته مهندسی عمران و مکانیک زمین (Terramechanics) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مهندسی پی، آزمایش PST به عنوان یک روش غیرمستقیم برای تعیین ظرفیت باربری خاک در محل استفاده می‌شود (۵). توانایی خاک‌ها برای باربری یا گسیخته شدن تحت بار اعمالی در این روش با رفتار آنها در طی عبور چرخ تراکتور رابطه دارد (۲۴). در این آزمایش بر یک صفحه صلب واقع روی سطح خاک، بارگذاری قائم اعمال شده و نشست عمودی صفحه اندازه‌گیری و منحنی بار-نشست رسم می‌گردد (۱۳).

تحکیم (Consolidation) می‌نامند در حالی که در خاک‌های غیراشع، تراکم نامیده می‌شود (۲). دلایل اصلی به وجود آمدن تراکم در خاک عبارت‌اند از: نشست طبیعی خاک، آبیاری غرقابی در خاک با ساختمان ضعیف، تردد ماشین‌های سنگین کشاورزی در سطح مزرعه و حرکت ادواتی همچون گاوآهن برگرداندار در خاک که در صورت نامناسب بودن شرایط خاک برای خاک‌ورزی موجب ایجاد کفه شخم (Plow pan) می‌شود (۱۷). تراکم خاک در زمین‌های زراعی ممکن است رشد محصولات را کاهش داده و هم‌چنین آثار محیطی نامطلوبی مانند کاهش نفوذ آب به خاک، افزایش رواناب در دوره زمانی بارندگی زیاد و نهایتاً فرسایش خاک به همراه داشته باشد (۸). تعیین درجه تراکم‌پذیری خاک، نیازمند تعیین شاخصی برای نشان دادن میزان تغییر در ویژگی‌های خاک است. تغییر در چگالی ظاهری (۱۵)، تخلخل (۲۲)، نسبت پوکی (۱۶) و توزیع اندازه منافذ (۱۲) خاک برای این منظور استفاده شده است (۷). از دیگر روش‌های ارزیابی تراکم‌پذیری خاک، استفاده از روابط نش فشاری-کرنش حجمی است. معمولاً این روابط به صورت نسبت پوکی (۶) یا کرنش حجمی (۴) خاک در برابر لگاریتم نش فشاری قائم (σ_n) نشان داده می‌شود (۱۴). این منحنی دارای دو ناحیه مجزای برگشت‌پذیر (استیک) در نش‌های پایین و خط فشردگی بکر (VCL) (Virgin compression line) در نش‌های بالاتر می‌باشد. نقطه تغییر رفتار خاک از برگشت‌پذیر (استیک) به برگشت‌ناپذیر (پلاستیک یا خمیری) در امتداد خط فشردگی بکر، نش‌پیش-تراکمی (Pre-compaction stress) یا پیش-تحکیمی (σ_{pc}) (Pre-compaction stress) consolidatıon stress نامیده می‌شود (۱۴). به عبارت دیگر چون خاک یک جسم استیک و ارجاعی نیست، در اثر هر بارگذاری-باربرداری مقداری تغییر شکل یا کرنش ماندگار در خاک اتفاق می‌افتد. به‌طورکلی تا زمانی که نش‌های وارد بر خاک از مقدار σ_{pc} تجاوز نکند، تغییر شکل در خاک برگشت‌پذیر و استیک می‌باشد. اما زمانی که نش اعمال شده از این حد عبور کند، تغییر شکل خاک برگشت‌ناپذیر و ماندگار

تراکم شده‌اند.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

خاک مورد استفاده در این پژوهش یک خاک لوم شنی بود که از مزرعه‌ای در جاده گلستانه (دشتی، اصفهان) با طول و عرض جغرافیایی $31^{\circ}53' N$ و $49^{\circ}45' E$ تحت کشت ذرت، نمونه‌برداری شد. نمونه‌برداری از لایه خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متر) به وسیله بیل انجام شد. بافت خاک به روش (Consistency limits) هیدرومتری تعیین شد. حدود قوام خاک (Liquid limit) به روش سه نقطه‌ای شامل حد روانی (LL) (Plastic limit) (PL) به روش فتیله ۳ کاساگراند، حد خمیری (SL) به روش انبساط (Shrinkage limit) می‌لتری و حد انقباض (Shrinkage limit) (SL) به روش استاندارد انگلیس BS اندازه‌گیری گردید (۳). درصد ماده‌آلی به روش اکسیداسیون تر اندازه‌گیری گردید (۲۴). برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

روش تهیه نمونه‌های خاک

خاک مورد بررسی هوا-خشک و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. با در نظر گرفتن مقدار ۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای چگالی ظاهری تر خاک و محاسبه حجم ظرف استوانه‌ای شکل (قطر ۲۸ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر)، جرم خاک مورد نیاز محاسبه گردید. سپس جرم آب مورد نیاز برای رساندن رطوبت نمونه به درصد رطوبت مورد نظر محاسبه و به خاک اضافه شد. سپس توده خاک آنقدر ورز داده شد تا رطوبت خاک تقریباً یکنواخت گردید. آنگاه در ۳ مرحله، خاک مرطوب درون ظرف ریخته شده، توسط چکش مخصوصی به چگالی مزبور رسانده شده و سپس تمام سطح نمونه‌ها با ورقه‌های پلاستیکی پوشانده شد. نهایتاً یک روز پس از تهیه و به تعادل رسیدن رطوبت در نمونه، پیش-بارگذاری و سپس آزمایش‌های بارگذاری مجدد روی خاک انجام گرفت.

اولین بار کاساگراند روشی برای یافتن حداکثر فشار وارد شده بر خاک پیشنهاد کرد که از روی منحنی نسبت پوکی-لگاریتم تنش عمودی تعیین می‌شود (۹). این روش به عنوان روش استاندارد شناخته می‌شود اگرچه کمی وقت‌گیر می‌باشد (۱۴). در این روش مختصات نقطه تقاطع خط VCL و نیمساز خط افقی و خط مماس بر نقطه با انحنای بیشینه منحنی به عنوان تنش پیش-تحکیمی معرفی گردید (۲ و ۱۴).

ارل نشان داد که برای تغییر شکل‌های کم، داده‌های به دست آمده از CCT شبیه داده‌های به دست آمده از PST می‌باشد (۶). داویدوسکی و همکاران کاربرد روش کاساگراند برای تعیین σ_{pc} در آزمایش PST را مورد بررسی قرار دادند. آنها با اعمال پیش‌بار مشخصی بر خاک و بارگذاری مجدد توسط دو روش CCT و PST به ارزیابی روش کاساگراند و مقایسه دو روش بارگذاری مذکور پرداختند. آنها نشان دادند که مقادیر σ_{pc} تخمینی حاصل از داده‌های آزمایش PST بالاتر از مقادیر آزمایش CCT بود، هرچند از نظر آماری این تفاوت معنی‌دار نبود (۱۰ و ۱۱).

مصدقی و مصدقی و همکاران روش‌های CCT و PST در برآورد تراکم‌پذیری و تعیین σ_{pc} خاک مزرعه و عوامل مؤثر بر آن را مورد ارزیابی قرار داد. وی بیان کرد که روش PST در مقایسه با روش CCT تخمین بهتری از σ_{pc} واقعی ایجاد شده توسط عبور تراکتور در مزرعه به دست می‌دهد. دلیل این امر بدین صورت بیان شد که در روش PST به دلیل دست نخورده بودن و تفاوت شرایط مرزی خاک زیر صفحه بارگذاری با شرایط مرزی داخل استوانه در آزمایش CCT، مقادیر σ_{pc} بالاتر و نزدیک‌تر به فشار تماسی تراکتور به دست می‌آید (۱ و ۲۰).

هدف از این پژوهش، کاربرد روش کاساگراند برای تعیین مقدار آستانه مقاومت تراکمی (تنش پیش-تراکمی) خاک با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) و مقایسه آزمایش‌های PST و CCT در جفت آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های خاکی بود که با مقدار بارهای معین پیش-

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

حدود پایداری (w/w)			ماده آلی (%)	درصد وزنی			بافت خاک
SL	PL	LL		رس	سیلت	شن	
۸/۲	۱۸/۴	۲۷/۷	۰/۷۸	۱۰	۲۶	۶۴	لوم شنی

LL و PL: به ترتیب بیانگر حد روانی، حد خمیری و حد انقباض خاک می‌باشند.

جابجایی (نشست) ۲۰ میلی‌متر به عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته شد. پس از پایان آزمایش PST، نمونه استوانه‌ای شکل (به قطر و ارتفاع به ترتیب ۵۳ و ۵۰ میلی‌متر) برای آزمایش فشردنگی محصور (CCT) از خاک قسمت دیگر ظرف تهیه گردید (شکل ۱). صفحه بارگذاری با قطر اندکی کمتر از قطر داخلی سیلیندر نمونه‌گیری، بین نمونه و محور بارگذاری دستگاه CBR قرار داده شد. بدلیل آن‌که برای هر آزمایش در میزان نشت به خصوصی، آب از نمونه خارج می‌گردید، بنابراین مبنای پایان یافتن آزمایش، شروع خروج آب از نمونه بود (۱۱).

برای تعیین تنش پیش-تراکمی (σ_{Pc}) از روش کاساگراند (۹) استفاده شد. در این روش، تغییر شکل خاک بر حسب لگاریتم تنش عمودی رسم می‌شود. برای یافتن تنش پیش-تراکمی (σ_{Pc}) به کمک این روش از منحنی تنش-نشست آزمایش PST و منحنی تنش-کرنش آزمایش CCT استفاده شد. در این مطالعه از دو سطح رطوبت خاک (۱۷ و ۱۹ درصد وزنی) و شش سطح پیش-بارگذاری (۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) برای تهیه نمونه‌های خاک با درجات متفاوت تراکم اولیه استفاده گردید. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل (۲×۶) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام گردید. برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS و برای مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل از نرم‌افزار آماری MSTATC استفاده گردید. میانگین‌ها در سطح احتمال ۵٪ و با استفاده از آزمون LSD با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نمونه‌ای از چگونگی تعیین σ_{pc} به کمک روش کاساگراند از

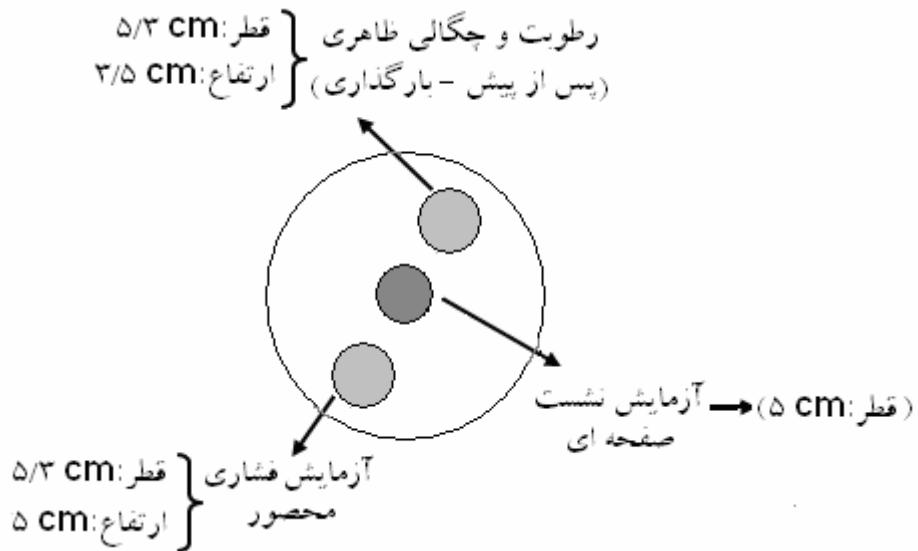
روش بارگذاری و شرایط آزمایش

برای انجام پیش-بارگذاری و انجام آزمایش‌های نشت صفحه‌ای (PST) و فشردنگی محصور (CCT) از دستگاه California Bearing Ratio (CBR) استفاده گردید. قطر پیستون دستگاه CBR در این آزمایش‌ها ۵۰ میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه بود. در حین آزمایش، بار وارد بخاک در فواصل جابجایی ۰/۵ میلی‌متر یادداشت شد.

برای پیش-بارگذاری روی سطح خاک، از صفحه‌ای با قطر ۲۷/۵ سانتی‌متر (که برای خروج هوا سوراخ دار شده بود) استفاده گردید و سپس با استفاده از دستگاه CBR بارگذاری انجام شد. با توجه به مساحت صفحه و میزان تنش پیش-باری مورد نظر، مقدار نیروی مورد نظر محاسبه و مقدار نیروی اعمال شده به خاک با استفاده از یک نیروسنجه کنترل شد. در تمام آزمایش‌های پیش-بارگذاری پس از رسیدن نیرو به سطح بار موردنظر، بار به مدت ۳۰ دقیقه روی نمونه باقی ماند. بنابراین، با انتخاب صفحه‌ای با قطری نزدیک به قطر ظرف، خاک به‌طور یکنواخت و به صورت محصور تحت پیش-بار (Pre-load) قرار گرفت.

پس از پیش-بارگذاری و قبل از انجام آزمایش‌های اصلی، برای تعیین رطوبت و چگالی ظاهری خاک، نمونه‌ای با استفاده از نمونه‌گیر استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۵۳ و ۳۵ میلی‌متر تهیه گردید (شکل ۱).

آزمایش‌ها به صورت دو ترکیب CCT-CCT و CCT-PST انجام گردید. این ترکیب‌ها بدین معنی است که پیش-بارگذاری در هر دو حالت توسط روش CCT انجام شد و بارگذاری مجدد به یکی از دو روش PST یا CCT صورت گرفت. آزمایش PST در وسط خاک پیش-بارگذاری شده انجام شد (شکل ۱). مقدار



شکل ۱. نمای بالایی محل آزمایش نشت صفحه‌ای (PST) و نمونه‌های خاک تهیه شده برای آزمایش فشردگی محصور (CCT) و تعیین رطوبت و چگالی ظاهری خاک

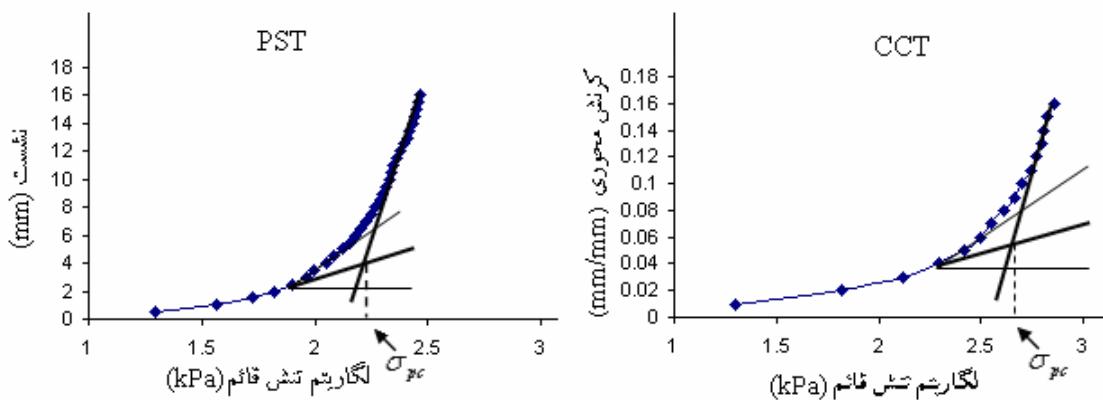
رابطه بین مقادیر نشن پیش-تراکمی به دست آمده از آزمایش های PST و CCT در شکل ۳ نشان داده شده است. معادله برآورد شده بر داده های حاصل از آزمایش های PST و CCT نشان داد که رابطه مناسب و معنی دار ($P < 0.1\%$) بین مقادیر PST و CCT می باشد.

مقایسه آماری اثر رطوبت خاک و پیش-بار بر نشن پیش-تراکمی در آزمایش های PST و CCT در جدول ۴ نشان شده است. در آزمایش PST، با افزایش رطوبت خاک، σ_{pc} برآورده شده به طور معنی داری کاهش یافته است. بنابراین، نتایج آزمایش PST نشان می دهد که با افزایش رطوبت خاک، آستانه نشن که در آن تغییر شکل ماندگار در خاک شروع می شود، کاهش یافته است که با مشاهدات مزرعه ای سازگار است (۱۷).

در صورتی که نتایج آزمایش CCT عکس این روش را نشان می دهد. در آزمایش CCT، با افزایش رطوبت خاک، ظرفیت باربری خاک (σ_{pc}) برآورده شده به طور معنی داری افزایش یافته

روی منحنی نشن-نشست در آزمایش PST و منحنی نشن-کرنش محوری برای آزمایش CCT در شکل ۲ نشان شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش ها در سطوح مختلف رطوبت خاک و پیش-بارگذاری در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به جدول ۲، نتایج آزمایش PST نشان می دهد که با افزایش مقدار پیش-بار، میزان نشن پیش-تراکمی نیز افزایش یافته است. ولی در نتایج آزمایش CCT روند منظمی در این مورد وجود ندارد. دست خوردگی خاک در حین نمونه گیری برای روش CCT نیز می تواند دلیلی بر تراکم پذیری بیشتر خاک در نشن های کمتر از نقطه تراکم (نقطه یا منحنی که منحنی های حاصل از آزمایش PST و CCT از هم دیگر جدا می شوند) باشد (۱۰، ۷ و ۱۱).

در جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر رطوبت خاک و پیش-بار بر نشن پیش-تراکمی برآورده شده، نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که اثرات رطوبت خاک، پیش-بار و اثر متقابل آنها بر نشن پیش-تراکمی (تعیین شده با دو آزمایش CCT و PST) معنی دار می باشند.



شکل ۲. نمونه‌ای از چگونگی تعیین تنش پیش-تراکمی (σ_{pc}) به کمک روش کاساگراند روی خاک پیش-بارگذاری شده با درصد رطوبت ۱۷، چگالی ظاهری $1/32$ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای دو آزمایش PST و CCT.

جعبه خاک استفاده کردند و شرایط پیش-بارگذاری و آزمایش PST به صورت نیمه محصور (Semi-confined condition) بود. مصدقی و همکاران (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که بدون توجه به شرایط خاک و بارگذاری، تخمین σ_{pc} توسط روش نیمه محصور دقیق‌تر از CCT می‌باشد (۲۱).

رابطه بین تنש پیش-تراکمی و تنش پیش-بار ترکیب آزمایش‌های CCT-PST و CCT-CCT در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ نمودارهای مربوط به آزمایش PST دارای عرض از مبدأ می‌باشند. بنابراین، می‌توان گفت تنها در پیش-بارهای بالاتر، تنش‌های خارجی تعیین کننده مقدار تنش پیش-تراکمی می‌باشند. در این نمودار تقریباً یک رابطه ۱:۱ بین مقادیر σ_{pc} و پیش-بار مربوط به آزمایش PST وجود دارد. ولی با توجه به شکل مربوط به آزمایش CCT مشاهده می‌شود که نمودارهای آن بدون در نظر گرفتن عرض از مبدأ یک رابطه خطی معنی‌دار شده‌اند، ولی، پراکنده‌ی داده‌ها روند غیرخطی تغییرات را نشان می‌دهد. کولن (۱۷) گزارش کرد که تخمین σ_{pc} به وسیله CCT برای خاک لوم رسی سیلیتی (سنگین) در شرایط مرتبط و در مقادیر بالای σ_{pc} مطلوب نیست. ولی در این تحقیق روند تغییرات σ_{pc} با افزایش پیش-بار ابتدا افزایشی و سپس کاهشی بود. دلیل این روند، اعمال پیش-بار به صورت بار ثابت در ظرفی با قطر انداز و از

است. جدول ۴ نشان‌دهنده وجود تنش پیش-تراکمی در پیش-بار صفر است. دلیل این امر وجود نیروهای داخلی حاصل از مکش ماتریک و تشکیل پیوندهای داخلی در مدت زمان یک روز باقی‌ماندن نمونه‌ها قبل از بارگذاری مجدد می‌باشد. با افزایش پیش-بار در آزمایش PST به طور معنی‌داری افزایش یافته است، در صورتی که چنین روندی به طور مشخص و کامل در نتایج آزمایش CCT مشاهده نمی‌شود. تنش پیش-تراکمی برآورد شده با آزمایش CCT چندین برابر مقادیر اعمال شده به نمونه‌ها می‌باشد. دلیل این پدیده، به اشباع رسیدن نمونه‌ها در حین پیش-بارگذاری (به ویژه در رطوبت 19%) می‌تواند باشد. زیرا در این آزمایش، شرایط آزمایش محصور بوده و تنش مؤثر محاسبه نگردیده است. در این حالت بخشنی از تنش کل (بار خارجی) توسط آب منفذی تحمل شده و چون آب تراکم‌پذیر نمی‌باشد افزایش قابل توجهی در مقادیر σ_{pc} در آزمایش CCT نسبت به آزمایش PST به دست آمده است. مصدقی و همکاران نیز دریافتند که روش PST (به دلیل دست‌نخورده بودن خاک) تخمین بهتری در مقایسه با روش CCT از σ_{pc} به دست می‌دهد (۲۰). داویدوسکی و همکاران نشان دادند که مقادیر σ_{pc} تخمینی حاصل از داده‌های آزمایش PST بالاتر از آزمایش CCT است. آنها برای انجام آزمایش‌ها از

جدول ۲. شرایط خاک قبل از بارگذاری مجدد و میانگین نتش پیش - تراکمی در آزمایش‌های نشت صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT)

نتش پیش - تراکمی	نیش از پیش - بارگذاری	شرایط خاک پیش - تراکمی	CCT (kPa)	PST (kPa)	چگالی ظاهری خشک (g cm ⁻³)			درطوت خاک (W/W) (%)			پیش - بار (kPa)
					S	σ	S _{p_d}	ρ_d	W _s	W	
۰/۰	۴۰/۱	۰/۴۰	۱۰/۹	۰	۱/۲۰	۰/۰۶	۰/۰۶	۱/۳۲	۰/۱	۱/۷/۲	۰
۱۴/۸	۱۰/۰	۰/۵/۶	۹/۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۱/۳۷	۰/۱	۱/۷	۲۵
۲۰۲/۸	۴۵۹/۸	۶/۴	۷۴/۹	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۸	۱/۶/۸	۰
۹۴/۷	۹۷۸/۷	۱۴/۴	۱۳۹/۹	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۱/۴۶	۰/۰۳	۱/۶/۷	۱۰۰
۶۱/۵	۸۴۵/۷	۶/۵	۶۶/۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۱/۵۸	۰/۱	۱/۷/۰۳	۱۵۰
۱۰۳/۷	۵۶۸/۷	۱۷/۱	۲۰۱/۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۱/۵۸	۰/۰۳	۱/۶/۸	۱۰۰
۱۲/۷	۵۸/۷	۲/۲	۳۱/۷	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۱/۴۴	۰/۲	۱/۸/۹	۰
۵۳/۴	۲۹۱/۷	۷/۸	۳۶/۹	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۱/۶	۰/۲	۱/۹/۲	۲۵
۳۱/۷	۴۲۱/۰	۰/۸	۷۲/۰	۰	۰	۰	۰	۱/۶۴	۰/۰۶	۱/۸/۸	۰
۹۹/۳	۳۲۲/۲	۱۷/۷	۹۹/۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۱/۶۷	۰/۱	۱/۸/۷	۱۰۰
۱۲۲/۴	۱۸۸۷۹/۱	۳۳/۲	۱۳۵/۸	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۱/۶۵	۰/۱	۱/۸/۵	۱۵۰
۴۶۲/۰	۱۵۱/۱۳	۱۳/۲	۱۴۲/۸	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۱/۶۷	۰/۰۶	۱/۸/۷	۱۰۰

W/W: درصد وزنی خشک.

W: به ترتیب میانگین و انحراف معیار رطوت خاک در سه تکرار است.

W_s: به ترتیب میانگین و انحراف معیار چگالی ظاهری خاک در سه تکرار است.

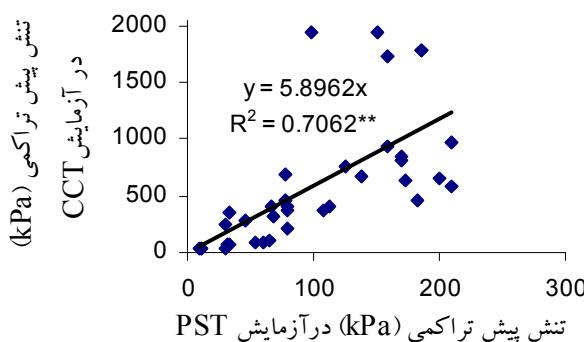
ρ_d : به ترتیب میانگین و انحراف معیار چگالی ظاهری خاک در سه تکرار است.

S: به ترتیب میانگین و انحراف معیار نتش پیش - تراکمی در سه تکرار است.

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر رطوبت خاک و پیش-بار بر تنش پیش-تراکمی براورد شده در آزمایش‌های PST و CCT

میانگین مربعات		درجه آزادی	منبع تغییر
CCT	PST		
۷۷۵۹۷۶***	۱۶۴۵۱**	۱	رطوبت خاک
۱۵۴۹۴۱۴/۷***	۲۶۴۵۲/۹***	۵	پیش-بار
۴۷۱۱۱۰/۵***	۷۳۷/۳*	۵	رطوبت × پیش-بار

*، ** و *** : به ترتیب بیانگر اثر معنی دار در سطوح آماری ۵، ۱ و ۰/۱ درصد می‌باشدند.



شکل ۳. رابطه بین تنش پیش-تراکمی به دست آمده از آزمایش‌های CCT و PST

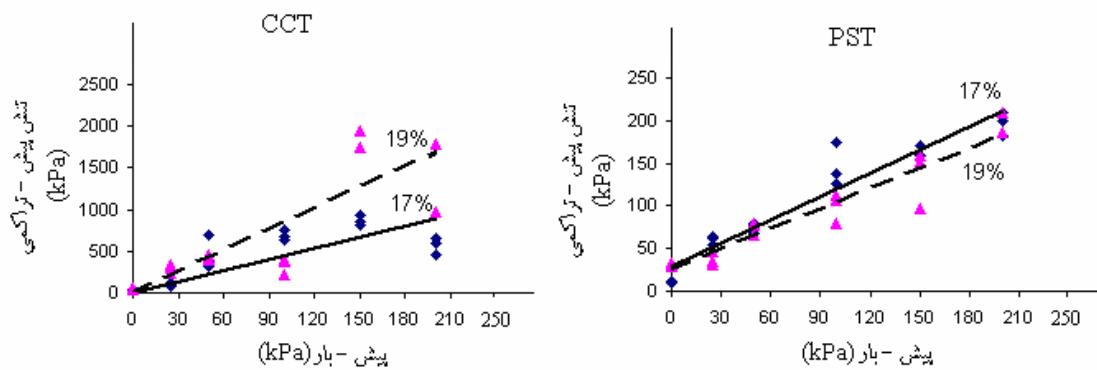
جدول ۴. اثر رطوبت خاک و پیش-بار بر میانگین تنش پیش-تراکمی در آزمایش‌های PST و CCT^۱

تنش پیش-تراکمی (kPa)		تیمار
CCT	PST	رطوبت خاک (٪.w/w)
۴۵۳/۸ ^b	۱۰۸/۸ ^a	۱۷
۷۴۷/۴ ^a	۹۵/۳ ^b	۱۹
		پیش-بار (kPa)
۴۹/۳ ^d	۲۱/۱ ^f	۰
۱۹۵/۸ ^d	۴۸/۴ ^e	۲۵
۴۴۰/۴ ^c	۷۴/۳ ^d	۵۰
۵۰۵/۹ ^c	۱۱۹/۶ ^c	۱۰۰
۱۰۴۰ ^b	۱۵۰/۹ ^b	۱۵۰
۱۳۷۲/۴ ^a	۱۹۷/۷ ^a	۲۰۰

- در هر ستون و برای هر تیمار، میانگین‌های با حروف غیرمشترک در سطح آماری ۵ درصد اختلاف معنی دار دارند.

در جدول ۵ مقادیر ضریب همبستگی بین σ_{pc} و پیش-بار آورده شده است. این ضرایب همبستگی نیز نشان می‌دهند که در آزمایش PST رابطه قوی‌تری بین σ_{pc} و پیش-بار وجود دارد.

بین رفتن شرایط محصور (خروج آب به دلیل تراکم ناپذیر بودن آب) و در نتیجه به اشباع رسیدن نمونه می‌تواند باشد. این روند در رطوبت ۱۹٪ و مقادیر پیش-بار بالا محسوس‌تر بود.



شکل ۴. رابطه بین تنش پیش - تراکمی و پیش - بار در رطوبت های وزنی ۱۷٪ و ۱۹٪ برای ازمایش های CCT و PST

جدول ۵. مقادیر ضریب همبستگی بین تنش پیش - تراکمی و پیش - بار

ضریب همبستگی (r)		رطوبت خاک (%w/w)
CCT آزمایش	PST آزمایش	
۰/۶۹	۰/۹۶	۱۷
۰/۸۵	۰/۹۶	۱۹

نتیجه گیری

- ۳- در ترکیب CCT-CCT، به علت اشباع شدن خاک در حین آزمایش اصلی، مقادیر براورده شده تنش پیش - تراکمی بسیار زیاد بود.
- ۴- آزمایش PST، روشهای مناسب برای برآورد مقاومت تراکمی (تنش پیش - تراکمی) خاک می باشد.

- ۱- در آزمایش PST، رابطه خطی با ضریب همبستگی بالا بین مقاومت تراکمی و پیش - بار وجود داشت.
- ۲- در آزمایش های PST و برای پیش - بارهای کم، تنش پیش - تراکمی براورده شده به علت اثر نیروهای داخلی حاصل از مکش ماتریک، بیشتر بود.

منابع مورد استفاده

1. مصدقی، م. ۱۳۸۲. تنش پیش - تراکمی و رابطه آن با ویژگی های فیزیکی و مکانیکی برخی از خاک های اصفهان. رساله دکتری خاک شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
2. وفاییان، م. ۱۳۷۶. خواص مهندسی خاک. نشر ارکان، اصفهان.
3. وفاییان، م. ۱۳۶۹. آزمایش های مکانیک خاک (مستند به استاندارد BS 1377-1975)، جلد دوم، نشر قومس - شفق، اصفهان.
4. Alexandrou, A. and R. Earl. 1995. *In situ* determination of the pre-compaction stress of a soil. J. Agric. Eng. Res. 61: 67-72.
5. Alexandrou, A. 1995. The development of techniques for assessing compactibility of field soils. PhD. Thesis, Silsoe College, Cranfield University, UK.
6. Alexandrou, A. and R. Earl. 1997. Development of a technique for assessment the behaviour of soil under load. J. Agric. Eng. Res. 68: 169-180.
7. Alexandrou, A., R. Earl and T.A. Gemtos. 2002. *In situ* assessment of soil compactibility. In: ASAE Annual

- International Meeting / CIGR XVth World Congress. Chicago, Illinois, USA, July 28-31, Paper No. 021088, 14pp.
8. Arvidsson, J. and T. Keller. 2004. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil Till. Res.* 77: 85-95.
 9. Casagrande, A. 1936. The determination of preconsolidation load and its practical significance. International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering. 22-26 June, Cambridge, MA, Vol. 3, pp.60-64.
 10. Dawidowski, J.B., J.E. Morrison and M. Snieg. 2000. Determination of soil precompaction stress from in situ tests. PP. 411-418. In: Horn, R., J.J.H. van den Akker and J. Arvidsson. (Eds.), Subsoil Compaction. Distribution, Processes and Consequences. Advances in GeoEcology 32. Catena Velag.
 11. Dawidowski, J.B., J.E. Morrison and M. Snieg. 2001. Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. *Trans. ASAE.* 44: 1059-1064.
 12. Eriksson, J. 1982. Soil compaction and root environment. Report 126, Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden.
 13. Gottelandnd, Ph. and O. Benoit. 2006. Sinkage tests for mobility study, modeling and experimental validation. *J. Terramech.* 43:451-467.
 14. Gregory, A.S., W.R. Whalley, C.W. Watts, N.R.A. Bird, P.D. Hallett and A.P. Whitmore. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil Till. Res.* 89:45-57.
 15. Håkansson, I. 1988. A method for characterizing the state of compactness of an arable soil. In: Drescher, J., R. Horn and M. De Boodt (Eds.), Impact of Water and External Forces on Soil Structure Germany. Hanover Pub.,
 16. Koolen, A.J. 1974. A method for soil compactibility determination. *J. Agric. Eng. Res.* 19: 271-278.
 17. Koolen, A.J. 1982. Precompaction stress determination on precompacted soil. Proceeding of 9th ISTRO Conference, Osijek, Yugoslavia. PP. 225-230.
 18. Koolen, A.J. and H. Kuipers. 1989. Soil deformation under compressive forces. PP.37-52. In: Larson, W.E., G.R. Blake, R.R. Allmaras, W.B. Voorhees and S.C. Gupta (Eds.), Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils. Proceedings of 2nd Workshop, NATO ASI Series, Kluwer, Dordrecht.
 19. Koolen, A.J. 1994. Mechanics of soil compaction. PP. 45-69. In: B.D. Soane and C. Van Ouwerkerk (Eds.), Soil Compaction in Crop Production. Elsevier Pub., Amsterdam.
 20. Mosaddeghi, M.R., A. Hemmat, M.A. Hajabbasi, M. Vafaeian and A. Alexandrou. 2006. Plate sinkage versus confined compression tests for In situ soil compressibility studies. *Biosys. Eng.* 93: (3): 325-334.
 21. Mosaddeghi, M.R., A.J. Koolen, A. Hemmat, M.A. Hajabbasi and P. Lerink. 2007. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structured soils. *J. Terramech.* 44: 53-63
 22. Soane, B.D., P.S. Blackwell, J.W. Dickson and D.J. Painter. 1981. Compaction by agricultural vehicles: a review. I: Soil and wheel characteristics. *Soil Till. Res.* 1: 207-237.
 23. Soehne, W.H. 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. *Agric. Eng.* 39: 276-281, 290.
 24. Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the effect of the digestive method for determining soil organic matter and the proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.