ارزیابی مقاومت تراکمی (تنش‌پیش- تراکمی) خاک با استفاده از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور

منا طهماسبی[۱*]، عباس همت[۱]، محمود وفاییان[۲] و محمدرضا مصدقی[۳]

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

چکیده

برای جلوگیری از تراکم خاک، دانستن حد تنش فشاری مجاز (مقاومت تراکمی) خاک حائز اهمیت می‌باشد. تنش پیش-تراکمی (σ_{pc}) به‌عنوان معیاری از مقاومت به تراکم خاک و برای تعیین درجه تراکم‌پذیری خاک پیشنهاد شده است. در این پژوهش، σ_{pc} خاک با استفاده از آزمایش‌های نشست 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 تنش پیش-باری (۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) استفاده شد. برای بررسی اثر رطوبت و تنش پیش-باری بر σ_{pc} براورده شده، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار استفاده شد. مقادیر σ_{pc} تعیین شده به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر ترکیب بارگذاری و شرایط رطوبتی خاک قرار گرفت. نتایج آزمایش PST نشان داد که با افزایش مقدار تنش 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} براورد شده به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. هم‌چنین نتایج نشان داد که با آزمایش PST، مقاومت تراکمی خاک (σ_{pc}) با دقت تعیین شد، در صورتی‌که مقادیر تعیین شده با آزمایش CCT، ۴/۵ (در رطوبت ۱۷٪) و ۸/۵ (در رطوبت ۱۹٪) برابر مقادیر تنش 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 براورد مقاومت تراکمی (تنش پیش- تراکمی) خاک بوده و در مدیریت پایدار خاک (از جنبه‌های ترددپذیری خاک و خاک‌ورزی) و اثر عوامل مختلف مدیریتی بر تنش پیش- تراکمی خاک قابل استفاده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، مقاومت خاک، تنش پیش-تراکمی، آزمایش نشست صفحه‌ای، آزمایش فشردگی محصور

مقدمه

از جمله عوامل مهم تخریب فیزیکی خاک، تراکم خاک (Soil compaction) می‌باشد. در سال‌های اخیر به‌دلیل افزایش اندازه مزارع و هم‌چنین توان و وزن ماشین‌های کشاورزی، تراکم خاک مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (۱ و ۲۲). فشردگی (Compression) به مفهوم فرایندی است که افزایش چگالی ظاهری را سبب می‌شود و ممکن است منشاء خارجی یا داخلی داشته باشد. در خاک‌های اشباع، فشردگی را

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]

تحکیم (Consolidation) می‌نامند در حالی‌که در خاک‌های غیراشباع، 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 (۲۳)، 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 تنش فشاری- کرنش حجمی است. معمولاً این روابط به‌صورت نسبت پوکی (e) یا کرنش حجمی (ε_v) خاک در برابر لگاریتم تنش فشاری قائم (σ_n) نشان داده می‌شود (۱۴). این منحنی دارای دو ناحیه مجزای برگشت‌پذیر (الاستیک) در تنش‌های پایین و خط فشردگی بکر (Virgin compression line) (VCL) در تنش‌های بالاتر می‌باشد. نقطه تغییر رفتار خاک از برگشت‌پذیر (الاستیک) به برگشت‌ناپذیر (پلاستیک یا خمیری) در امتداد خط فشردگی بکر، تنش پیش- تراکمی (Pre-compaction stress) (σ_{pc}) یا پیش- تحکیمی (Pre-consolidation stress) نامیده می‌شود (۱۴). به عبارت دیگر چون خاک یک جسم الاستیک و ارتجاعی نیست، در اثر هر بارگذاری–باربرداری مقداری تغییر شکل یا کرنش ماندگار در خاک اتفاق می‌افتد. به‌طورکلی تا زمانی‌که تنش‌های وارد بر خاک از مقدار σ_{pc} تجاوز نکند، تغییر شکل در خاک برگشت پذیر و الاستیک می‌باشد. اما زمانی‌که تنش اعمال شده از این حد عبور کند، تغییر شکل خاک برگشت‌ناپذیر و ماندگار 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 به‌عنوان تنها روش اندازه‌گیری σ_{pc} در مهندسی عمران پیشنهاد شده است و بارگذاری در آن به‌صورت مرحله‌ای و با فواصل زمانی طولانی صورت می‌گیرد به‌طوری‌که تغییرات حجم نمونه مورد آزمایش با زمان اندک باشد. آزمایش فشردگی محصور (Confined Compression Test) (CCT) همان آزمایش تحکیم است با این تفاوت که در خاک غیراشباع به‌کار می‌رود و آزمایش قبل از خروج آب از خاک خاتمه می‌یابد (۱۸ و ۱۹). CCT توسط مهندسین کشاورزی و خاک‌شناسی به‌عنوان یک روش آسان و سریع برای تعیین تنش‌پیش- تراکمی و تراکم‌پذیری خاک‌ها استفاده شده است، ولی در براورد رفتار واقعی خاک‌های طبیعی و در محل معایبی دارد. فشارهای جانبی اعمال شده به نمونه در این روش بیشتر از خاک مزرعه می‌باشد. هم‌چنین ایجاد خطا به 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) 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 به‌عنوان 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).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]

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 به‌عنوان روش استاندارد شناخته می‌شود اگر چه 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 به‌عنوان تنش پیش-تحکیمی معرفی گردید (۲ و۱۴).

ارل نشان داد که برای تغییر شکل‌های کم، داده‌های به‌دست آمده از CCT شبیه داده‌های به‌دست 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 پیش-بار 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 PST و CCT در براورد 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 به‌دست می‌دهد. دلیل این امر بدین صورت بیان شد که در روش PST به‌دلیل 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 به‌دست 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- 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 ′۳۱/۵۳ °۳۲ N و ′۴۹/۴ °۵۱ E تحت کشت ذرت، نمونه‌برداری شد. نمونه‌برداری از لایه خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) به وسیله بیل انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین شد. حدود قوام خاک (Consistency limits) شامل حد روانی(Liquid limit) (LL) به روش سه نقطه‌ای کاساگراند، حد خمیری(Plastic limit) (PL) به روش فتیله ۳ میلی‌متری 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 ۱/۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]

جدول۱. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

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

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

روش بارگذاری و شرایط آزمایش

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

برای پیش- بارگذاری روی سطح خاک، از صفحه‌ای با قطر ۲۷/۵ سانتی‌متر (که برای خروج هوا سوراخ‌دار 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 نیروسنج 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 به‌صورت 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 به‌صورت دو ترکیب CCT-PST و CCT-CCT 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 جابجایی (نشست)۲۰ میلی‌متر به‌عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته شد. پس از پایان آزمایش PST، نمونه استوانه‌ای شکل (به قطر و ارتفاع به ترتیب ۵۳ و۵۰ میلی‌متر) برای آزمایش فشردگی محصور (CCT) از خاک قسمت دیگر ظرف تهیه گردید (شکل ۱). صفحه بارگذاری با قطر اندکی کمتر از قطر داخلی سیلندر نمونه‌گیری، بین نمونه و محور بارگذاری دستگاه CBR قرار داده شد. به‌دلیل آن‌که برای هر آزمایش در میزان نشست به‌خصوصی، 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.

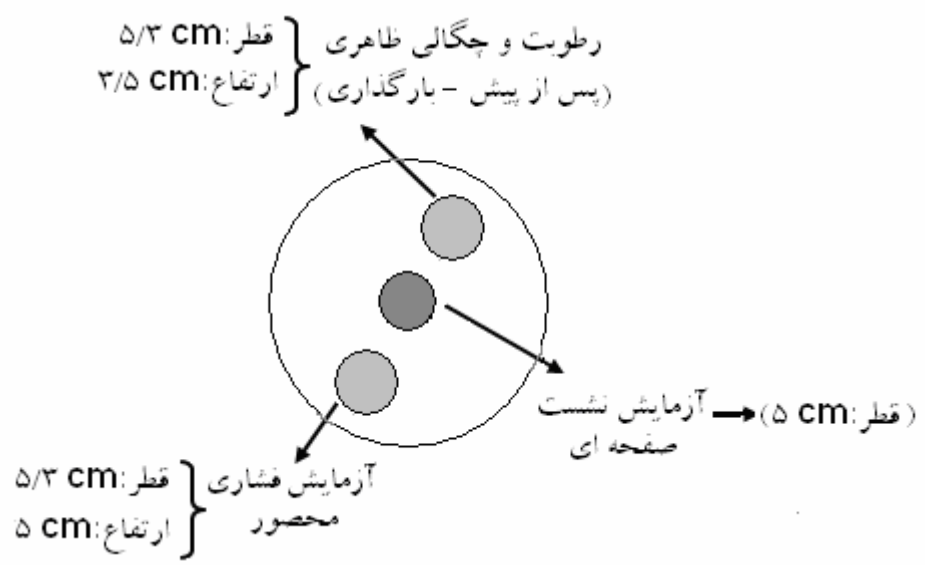
در این مطالعه از دو سطح رطوبت خاک (۱۷ و ۱۹ درصد وزنی) و شش سطح پیش- بارگذاری (۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) برای تهیه نمونه‌های خاک با درجات متفاوت تراکم اولیه استفاده گردید. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل (۶×۲) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام گردید. برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]



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

روی منحنی تنش- نشست در آزمایش PST و منحنی تنش- کرنش محوری برای آزمایش CCT در شکل ۲ نشان شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها در سطوح مختلف رطوبت خاک و پیش- بارگذاری در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به جدول ۲، نتایج آزمایش PST نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پیش- بار، میزان تنش پیش- تراکمی نیز افزایش یافته است. ولی در نتایج آزمایش CCT روند منظمی در این مورد وجود ندارد. دست‌خوردگی خاک در حین نمونه‌گیری برای روش CCT نیز می‌تواند دلیلی بر تراکم‌پذیری بیشتر خاک در تنش‌های کمتر از نقطه تراکم (نقطه یا تنشی که منحنی‌های حاصل از آزمایش PST و CCT از همدیگر جدا می‌شوند) باشد (۱، ۷، ۱۰ و ۱۱).

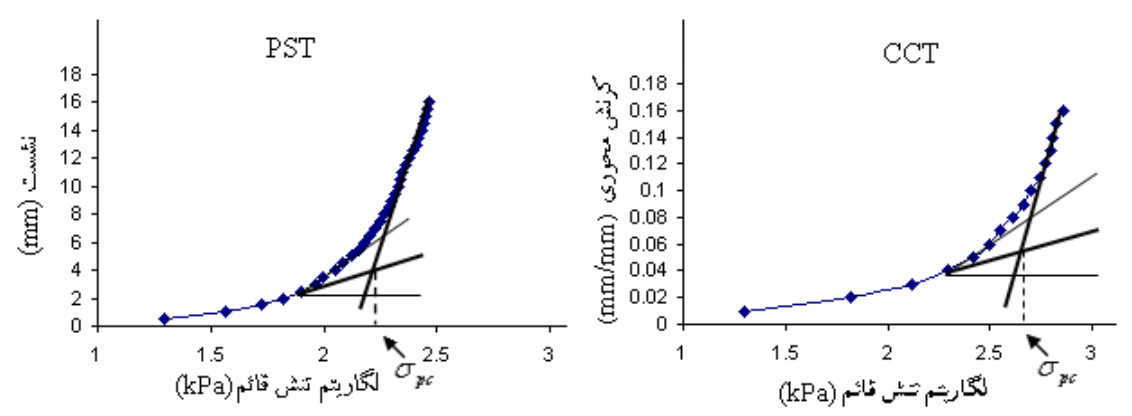
در جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر رطوبت خاک و پیش- بار بر تنش پیش-تراکمی براورد شده، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثرات رطوبت خاک، پیش-بار و اثر متقابل آنها بر تنش پیش-تراکمی (تعیین شده با دو آزمایش PST و CCT) معنی‌دار می‌باشند.

رابطه بین مقادیر تنش پیش-تراکمی به‌دست آمده از آزمایش‌های PST و CCT در شکل ۳ نشان داده شده است. معادله برازش شده بر داده‌های حاصل از آزمایش‌های PST و CCT نشان داد که رابطه مناسب و معنی‌دار ($P < ٪۱$) بین مقادیر تنش پیش- تراکمی در آزمایش CCT و PST وجود دارد، هر چند مقادیر تنش پیش- تراکمی به‌دست آمده از آزمایش CCT حدود ۶ برابر مقادیر در آزمایش PST می‌باشد.

مقایسه آماری اثر رطوبت خاک و پیش- بار بر تنش پیش- تراکمی در آزمایش‌های PST و CCT در جدول ۴ نشان شده است. در آزمایش PST، با افزایش رطوبت خاک، σ_{pc} براورد شده به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. بنابراین، نتایج آزمایش PST نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت خاک، آستانه تنش که در آن تغییر شکل ماندگار در خاک شروع می‌شود، کاهش یافته است که با مشاهدات مزرعه‌ای سازگار است (۱۷). در صورتی‌که نتایج آزمایش CCT عکس این روش را نشان می‌دهد. در آزمایش CCT، با افزایش رطوبت خاک، ظرفیت باربری خاک (σ_{pc}) براورد شده به‌طور معنی‌داری افزایش یافته

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]



شکل۲. نمونه‌ای از چگونگی تعیین تنش پیش-تراکمی (σ_{pc}) به کمک روش کاساگراند روی خاک پیش- بارگذاری شده با درصد رطوبت ۱۷، چگالی ظاهری ۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای دو آزمایش PST و CCT.

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، σ_{pc} به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است، در صورتی‌که چنین روندی به‌طور 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 ۱۹٪) می‌تواند باشد. زیرا در این آزمایش، شرایط آزمایش محصور بوده و تنش مؤثر محاسبه نگردیده است. در این حالت بخشی 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 به‌دست آمده است. مصدقی و همکاران نیز دریافتند که روش PST (به‌دلیل دست‌نخورده بودن خاک) تخمین بهتری در مقایسه با روش CCT از σ_{pc} به‌دست 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 جعبه خاک استفاده کردند و شرایط پیش- بارگذاری و آزمایش PST به‌صورت 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 تنش 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 رابطه۱:۱ 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 با یک رابطه خطی معنی‌دار شده‌اند، ولی، پراکندگی داده‌ها روند غیرخطی تغییرات را نشان می‌دهد. کولن (۱۷) گزارش کرد که تخمین σ_{pc} به وسیله CCT برای خاک لوم رسی سیلتی (سنگین) در شرایط مرطوب 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 به‌صورت بار ثابت در ظرفی با قطر اندک و از

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4] [Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

جدول۲. شرایط خاک قبل از بارگذاری مجدد و میانگین تنش پیش-تراکمی در آزمایش‌های نشست صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT)

پیش- بار (kPa)	شرایط خاک پس از پیش- بارگذاری				تنش پیش- تراکمی (kPa)			
	رطوبت خاک (%w/w)		چگالی ظاهری خشک ($g\ cm^{-3}$)		PST		CCT	
	w	w_s	ρ_d	S_{ρ_d}	σ	S	σ	S
۰	۱۷/۲	۰/۰۶	۱/۲۰	۰	۱۰/۶	۰/۴۰	۴۰/۱	۰/۵
۲۵	۱۷	۰/۱	۱/۳۲	۰/۰۲	۶۰/۰	۵/۶	۱۰۰/۰	۱۴/۸
۵۰	۱۶/۸	۰/۲	۱/۳۷	۰/۰۸	۷۴/۹	۶/۴	۴۵۹/۸	۲۰۲/۸
۱۰۰	۱۶/۷	۰/۳	۱/۴۶	۰/۰۶	۱۳۹/۶	۱۴/۶	۶۸۸/۶	۶۴/۷
۱۵۰	۱۷/۰۳	۰/۱	۱/۵۸	۰/۰۳	۱۶۶/۰	۶/۵	۸۶۵/۷	۶۱/۵
۲۰۰	۱۶/۸	۰/۳	۱/۶۸	۰/۰۰۵	۲۰۱/۶	۱۷/۱	۵۶۸/۷	۱۰۳/۲
۰	۱۸/۹	۰/۲	۱/۴۴	۰/۰۳	۳۱/۷	۲/۲	۵۸/۵	۱۴/۷
۲۵	۱۹/۲	۰/۲	۱/۶	۰/۰۳	۳۶/۹	۷/۸	۲۹۱/۷	۵۳/۴
۵۰	۱۸/۸	۰/۰۶	۱/۶۴	۰	۷۲/۰	۵/۸	۴۲۱/۰	۳۱/۷
۱۰۰	۱۸/۷	۰/۱	۱/۶۷	۰/۰۰۵	۹۹/۶	۱۷/۷	۳۲۳/۲	۹۹/۳
۱۵۰	۱۸/۵	۰/۱	۱/۶۵	۰/۰۲	۱۳۵/۸	۳۳/۲	۱۸۷۹/۱	۱۲۲/۴
۲۰۰	۱۸/۷	۰/۰۶	۱/۶۷	۰/۰۱	۱۹۳/۸	۱۳/۲	۱۵۱۱/۳	۴۶۲/۵

w/w: درصد وزنی خشک.

w و w_s: به ترتیب میانگین و انحراف معیار رطوبت خاک در سه تکرار است.

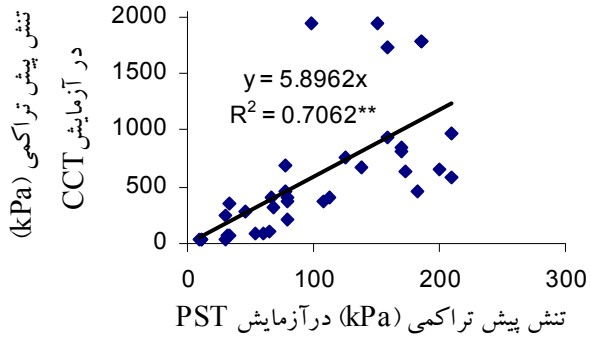
ρ_d و S_{ρ_d}: به ترتیب میانگین و انحراف معیار چگالی ظاهری خاک در سه تکرار است.

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

جدول۳. تجزیه واریانس اثر رطوبت خاک و پیش- بار بر تنش پیش- تراکمی براورد شده در آزمایش‌های PST و CCT

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		PST	CCT
رطوبت خاک	۱	۱۶۴۵/۱**	۷۷۵۹۷۶***
پیش-بار	۵	۲۶۴۵۲/۹***	۱۵۴۹۴۱۴/۷***
رطوبت × پیش-بار	۵	۷۳۷/۳*	۴۷۱۱۱۰/۵***

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



شکل۳. رابطه بین تنش پیش- تراکمی به‌دست آمده از آزمایش‌های PST و CCT

جدول۴. اثر رطوبت خاک و پیش-بار بر میانگین تنش پیش-تراکمی در آزمایش‌های PST و CCT [۱]

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

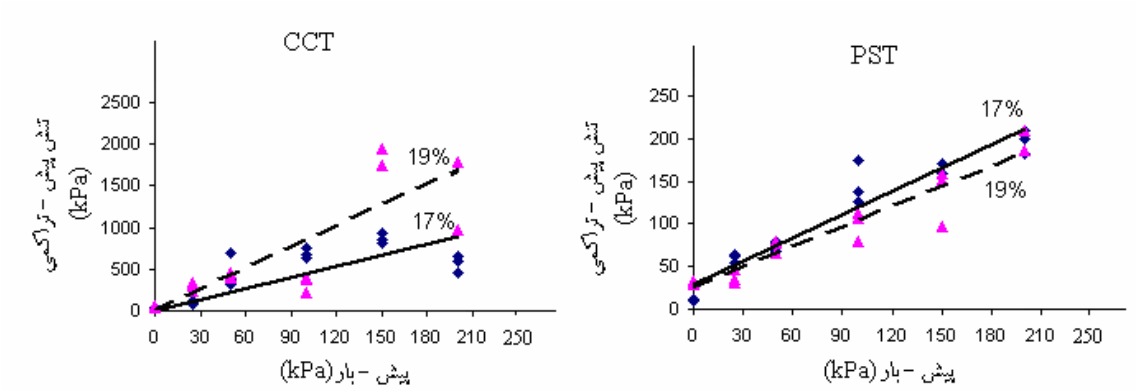
- در هر ستون و برای هر تیمار، میانگین‌های با حروف غیرمشترک در سطح آماری ۵ درصد اختلاف معنی‌دار دارند.

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

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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]



شکل۴. رابطه بین تنش پیش- تراکمی و پیش- بار در رطوبت‌های وزنی ۱۷٪ و ۱۹٪ برای ازمایش‌های PST و CCT

جدول۵. مقادیر ضریب هم‌بستگی بین تنش پیش- تراکمی و پیش- بار

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

نتیجه‌گیری

۱- در آزمایش PST، رابطه خطی با ضریب هم‌بستگی بالا بین مقاومت تراکمی و پیش-بار وجود داشت.

۲- در آزمایش‌های PST و برای پیش- بارهای کم، تنش پیش-تراکمی براورد شده به علت اثر نیروهای داخلی حاصل از مکش ماتریک، بیشتر بود.

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، روشی مناسب برای برآورد مقاومت تراکمی (تنش پیش-تراکمی) خاک می‌باشد.

منابع مورد استفاده

۱. مصدقی، م. ۱۳۸۲. تنش پیش- تراکمی و رابطه آن با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی برخی از خاک‌های اصفهان. رساله دکتری خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲. وفاییان، م. ۱۳۷۶. *خواص مهندسی خاک*. نشر ارکان، اصفهان.

۳. وفاییان، م. ۱۳۶۹. *آزمایش‌های 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]

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. Gottelannd, 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.19.4]