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

مریم صالحیان دستجردی و عباس همت[1*]

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

چکیده

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

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

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

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ahemmat@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]

مقدمه

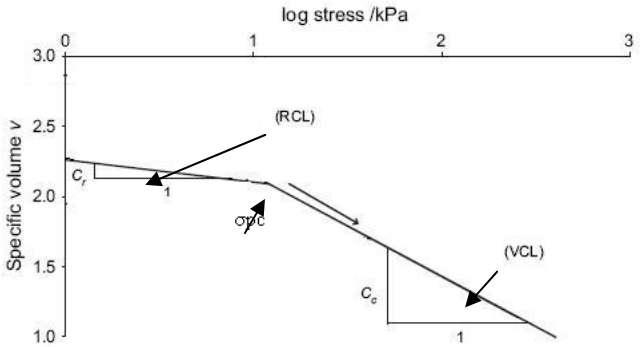
تراکم خاک به فرآیند کاهش حجم خاک در اثر خروج هوای منفذی گفته می‌شود. از عوامل تأثیرگذار بر تراکم خاک‌ها، می‌توان بافت، ساختمان، مقدار رطوبت، درصد آهک، مقدار ماده‌آلی خاک را نام برد (۲۰). مقدار آب موجود در خاک به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در تراکم خاک است (۱۶و۱۷). آب خاک معمولاً در فرآیند تراکم، در فواصل بزرگ جابه‌جا نمی‌شود، بلکه پتانسیل آن تغییر می‌کند. حجم ذرات جامد نیز تغییر نمی‌کند، اگرچه آنها آرایش جدیدی انتخاب می‌کنند. کولن معتقد است که در خاک‌های کشاورزی، علاوه بر نیروهای خارجی وارده به خاک، به تراکم خاک در اثر فرآیندهای داخلی (حاصل از نیروهای مکش آب خاک) نیز باید توجه شود (۱۲). تروخشک شدن با ایجاد تنش در خاک، ساختمان فیزیکی آن را تغییر می‌دهد. کلر و همکاران نشان دادند که در طول مرطوب‌شدن خاک، مقاومت آن کاهش می‌یابد و ساختمان به‌طور آهسته عوض می‌شود؛ هم‌چنین خاکدانه‌ها بدون مشاهده‌ی تغییر در سطح رطوبت خاک، به‌هم می‌پیوندند (۱۰). هنگامی که خاک‌های غیراشباع تحت تنش‌های داخلی و خارجی قرار می‌گیرند، در اثر جوش خوردن خاکدانه‌ها و تبدیل آنها به واحدهای بزرگ‌تر، منافذ خاک کاهش می‌یابد (۶). مشاهدات پژوهشگران نشان داده است، زمانی که خاکدانه‌ها تحت نیروهای فشاری خارجی قرار می‌گیرند، کاهش در حجم خاک، عمدتاً در اثر تغییر شکل خمیری در محل تماس خاکدانه‌ها می‌باشد. زمانی که تنش برشی اعمال‌شده بیشتر از مقاومت برشی خاک شود، تغییر شکل رخ می‌دهد. صاف‌شدن رویه‌های تماس خاکدانه‌ها، تنش‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و بنابراین برای یک سطح تنش داده‌شده، از تغییر شکل نامحدود جلوگیری می‌شود (۸). تغییر شکل خمیری در نقاط تماس خاکدانه‌ها تحت چرخه‌های تروخشک شدن نیز رخ می‌دهد. خاکدانه‌ها با به‌هم پیوستن محل تماسشان، واحدهای بزرگی را تشکیل می‌دهند. در این حالت قسمتی از منافذ بین خاکدانه‌ها حفظ شده و فقط اندازه‌ی آنها کاهش می‌یابد (۶).

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

امروزه روش‌های آزمایشگاهی متعددی برای تعیین پارامترهای تراکمی خاک‌های کشاورزی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، آزمایش فشردگی یک‌بعدی (ادومتر) است. در این آزمایش، بارهای ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال، هر یک به‌مدت ۵ تا ۳۰ دقیقه به‌طور مرحله‌ای بر نمونه‌های استوانه‌ای خاک وارد می‌شود و در پایان هر فاصله‌ی زمانی، تغییر شکل عمودی خاک قرائت می‌گردد. علاوه بر این روش، از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT) نیز استفاده می‌شود (۱و۹). در این دو روش علاوه بر این‌که به‌زمان کمی برای انجام آنها نیاز است، به دو روش آزمایشگاهی و صحرایی (۱۵) نیز قابل اجرا هستند. در آزمایش فشردگی محصور، خاک در درون یک سیلندر صلب توسط یک پیستون متحرک به‌سمت پایین با یک نرخ ثابت متراکم می‌شوند و تنش وارده به پیستون و تغییر حجم خاک به‌طور پیوسته ثبت می‌گردد. کولن و همکاران (۱۱)، لارسون و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]



شکل ۱. منحنی فشردگی خاک که در آن حجم ویژه در برابر لگاریتم تنش را نشان می‌دهد. RCL وVCL به‌ترتیب نشانگرخط فشردگی مجدد و خط فشردگی بکر است (۱۰)

جدول ۱. برخی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه[1]

بافت	شن	سیلت	رس	LL	PL	SL	PI	FI	FC	$CaCO_3$	OM
رس سیلتی	۱۲	۴۶	۴۲	۳۴/۲	۱۹/۰	۶/۷	۱۵/۲	۱۲/۳	۲۵	۶۳	۰/۴۲

[1] LL, PL, SL, PI, FI, FC و OM به ترتیب بیان‌کننده‌ی حد روانی، حد خمیری، حد انقباض، شاخص خمیری، شاخص تردی، گنجایش زراعی و موادآلی است که همگی به‌صورت درصد بیان شده‌اند.

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

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

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک مورد بررسی

برای انجام این پژوهش، یک نوع خاک رویین (عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری) با بافت ریز از مزارع شرکت طرح توسعه نیشکر و صنایع جانبی اهواز تهیه شد. بافت خاک به‌روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (۱۸). حدود پایداری خاک، شامل حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و حد انقباض (SL) به‌روش استاندارد BS اندازه گرفته شد (۱۴). تفاوت LL و PL به‌عنوان شاخص خمیری (PI) و تفاوت PL و SL به‌عنوان شاخص تردی (FI) محاسبه گردید. درصد آهک و موادآلی به‌ترتیب به‌روش‌های خنثی‌کردن با اسید و سوزاندن تر اندازه‌گیری شد (۲۱). مقدار گنجایش زراعی (FC) به‌روش صفحات فشاری در فشار ۰/۳ بار و با سه تکرار تعیین شد. برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

روش تهیه نمونه‌های خاک

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]

روش زیر آماده گردیدند:

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

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

با توجه به این‌که مقدار EC آب مورد استفاده برای آبیاری نقش مهمی در میزان سخت‌شدگی خاک دارد و هم‌چنین آب مورد استفاده برای آبیاری مزارع نیشکر دارای EC متغیر و بین ۱-۲/۵ dS/m است (مذاکره شفاهی با کارشناس آزمایشگاه خاک طرح توسعه نیشکر اهواز)، آبی با EC برابر با ۱/۶۵ dS/m تهیه گردید. مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن خاک به‌رطوبت FC محاسبه گردید و روی سطح پلاستیک ریخته شد. پس از فرو رفتن کامل آب به‌درون خاک، روکش پلاستیکی برداشته شد و ظرف پس از وزن‌شدن به درون آونی با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین دمای فصل رشد نیشکر) منتقل گردید. پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها مرتباً وزن شدند تا زمانی‌که رطوبت آن به مقدار ۰/۷ گنجایش زراعی (FC) (مقدار رطوبت خاک در موقع آبیاری) رسید. در این هنگام، رطوبت نمونه‌ها به‌منظور یکنواخت مرطوب شدن آن‌ها و نیز کم‌بودن مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن نمونه‌ها به‌رطوبت FC نسبت به‌مرحله اول مرطوب کردن، آب با استفاده از آب‌فشان به‌نمونه‌ها اضافه گردید و ظرف مجدداً درون آون قرار گرفت. مراحل مرطوب و خشک کردن هر ظرف محتوی خاک تا ۵ مرتبه و در مدت ۲۰-۱۵ روز انجام گرفت. در آخرین چرخه، خشک کردن نمونه‌ها تا زمانی که رطوبت نمونه‌های خاک به ۰/۹PL یا ۱/۱PL برسد، ادامه یافت. سپس نمونه‌ها با پارچه‌ی مرطوب و روکش پلاستیکی پوشانده شدند و به‌مدت ۲۴ ساعت باقی ماندند تا رطوبت به‌طور یکنواخت در آنها توزیع گردد. پس از تهیه‌ی نمونه، آزمایش‌ها به دو صورت ادامه یافت. در برخی از آزمایش‌ها پس از تهیه‌ی نمونه، سطح خاک بارگذاری شد و در برخی دیگر بدون اعمال بار متراکم‌کننده، مراحل بعدی انجام گرفت. در مورد نمونه‌های بارگذاری شده به‌این ترتیب عمل شد که روی سطح خاک صفحه‌ی فلزی سوراخ دار به قطر ۲۵ سانتی‌متر قرار داده شد و توسط دستگاه CBR بارگذاری با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه وارد شد. پس از رسیدن بار به‌مقدار مورد نظر، نمونه به‌مدت ۳۰ دقیقه تحت بار نگه داشته شد. سپس در مرکز همه نمونه‌ها آزمایش PST انجام شد. برای انجام این آزمایش از یک صفحه‌ی دایره‌ای فلزی و صلب به قطر و ضخامت به‌ترتیب ۵۰ و ۵ میلی‌متر استفاده گردید. این صفحه در مرکز نمونه قرار گرفت و یک استوانه‌ی فلزی صلب به‌منظور جلوگیری از ایجاد اصطکاک بین سیلندر دستگاه CBR و خاک بر روی آن گذارده شد، سپس بار توسط سیلندر دستگاه CBR و با سرعت ۱ میلی‌متر در دقیقه و تا نشست ۱۰ میلی‌متر انجام گرفت. پس از آن منحنی لگاریتم تنش-نشست برای تعیین تنش پیش-تراکمی،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]

در دامنه‌ی نشست ۱۰-۰ میلی‌متر رسم گردید. استوانه‌ی درنظر گرفته برای آزمایش فشردگی محصور دارای قطر و ارتفاع به‌ترتیب ۵۴ و ۴۹ میلی‌متر بود. به‌منظور کاهش اصطکاک بین دیواره‌ی استوانه و خاک، پیش از تهیه‌ی نمونه، درون آن با لایه‌ی نازکی از گریس پوشانده شد. پس از تهیه‌ی نمونه، یک صفحه‌ی صلب فلزی به‌قطر ۵۰ میلی‌متر روی سطح آن قرارداده شد و بارگذاری توسط سیلندر CBR روی این صفحه انجام گرفت. زمان خروج آب از انتهای نمونه به‌عنوان پایان آزمایش درنظر گرفته شد (۷). سپس منحنی لگاریتم تنش-کرنش برای بررسی رفتار خاک ترسیم گردید. تنش پیش-تراکمی در آزمایش‌های PST و CCT با استفاده از روش کاساگراند تعیین شد.

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

نتایج و بحث

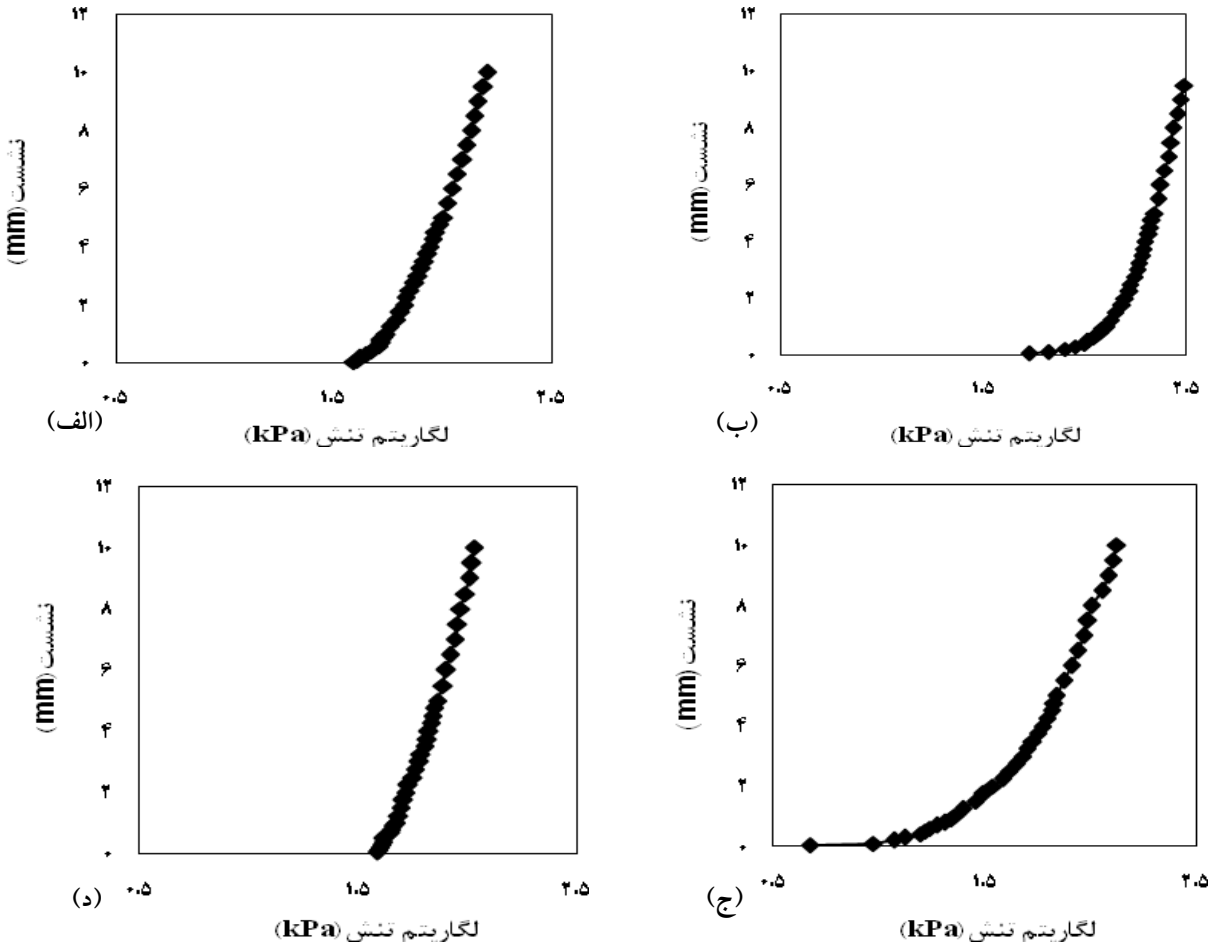
نمونه‌هایی از منحنی لگاریتم تنش-نشست در آزمایش PST، در شکل۲ نشان داده شده است. نمودار لگاریتم تنش-نشست در نمونه‌های بازسازی‌شده و بدون فرآیند تروخشک شدن و به‌ویژه در رطوبت ۱/۱PL، بیشتر شبیه رفتار خاک با فشردگی عادی (Normal compression) است و رفتار خاک عمدتاً در راستای خط فشردگی بکر (VCL) می‌باشد (شکل۲ الف و ج). در این نمونه‌ها، تغییر انحنای منحنی در ناحیه بحرانی (تغییر از حالت الاستیک به خمیری) بسیار تدریجی است. درصورتی‌که در اثر فرآیند تروخشک شدن، خاک حالت فوق فشردگی (Over-compression) پیدا نموده و دو ناحیه‌ی منحنی (ناحیه فشردگی مجدد و خط فشردگی بکر) خیلی مشخص‌تر می‌باشد و شکل منحنی آن از منحنی دو جزیی خطی (Bi-linear curve) تابعیت می‌کند. این نوع رفتار برای نمونه‌های دست‌نخورده و تحت آزمایش تک‌محوری در پژوهش‌های تانگ و همکاران نیز گزارش شده است (۱۹). در نمونه‌های بازسازی‌شده و بدون اعمال بار، مقاومت فشاری (تنش پیش-تراکمی؛ σ_{pc}) عمدتاً به‌علت تشکیل پیوندهای آبی (هلال‌های آبی) بین ذرات خاک در مدت ۲۴ ساعت نگه داشتن نمونه‌ها می‌باشد (۹). ولی، در خاک‌هایی که تحت فرآیند تروخشک شدن قرار گرفته بودند، آرایش مجدد ذرات در فرآیند تروخشک شدن و احتمالاً رسوب ذرات رس بین ذرات درشت‌تر (شن و سیلت) و صاف شدن رویه‌های تماس خاکدانه‌ها، در اثر تغییر شکل ویسکوز در پاسخ به‌کشش داخلی هلال‌های آبی بین خاکدانه‌ها، موجب ظهور حالت فوق فشردگی در خاک شده است (۶). دراین‌حالت، خاک برای تغییر از حالت الاستیک به‌خمیری، نیاز به سطح تنش بیشتری دارد و بنابراین مقاومت فشاری (تنش پیش-تراکمی) بیشتر از خود نشان داد.

نمونه‌هایی از منحنی لگاریتم تنش-کرنش در آزمایش CCT در شکل۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودار از منحنی S-شکل (Sigmoid) تابعیت می‌کند. این نوع رفتار در آزمایش تک‌محوری برای خاک‌های با درصد رس و یا رطوبت زیاد، توسط تانگ و همکاران نیز گزارش شده است (۱۹). در مدل S-شکل در تنش‌های بالا، انتهای منحنی فشردگی از راستای خطی منحنی فشردگی بکر منحرف می‌شود. این رفتار با افزایش درجه‌ی اشباع خاک در اواخر آزمایش فشردگی و غیرقابل تراکم‌شدن خاک، قابل تفسیر است.

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]



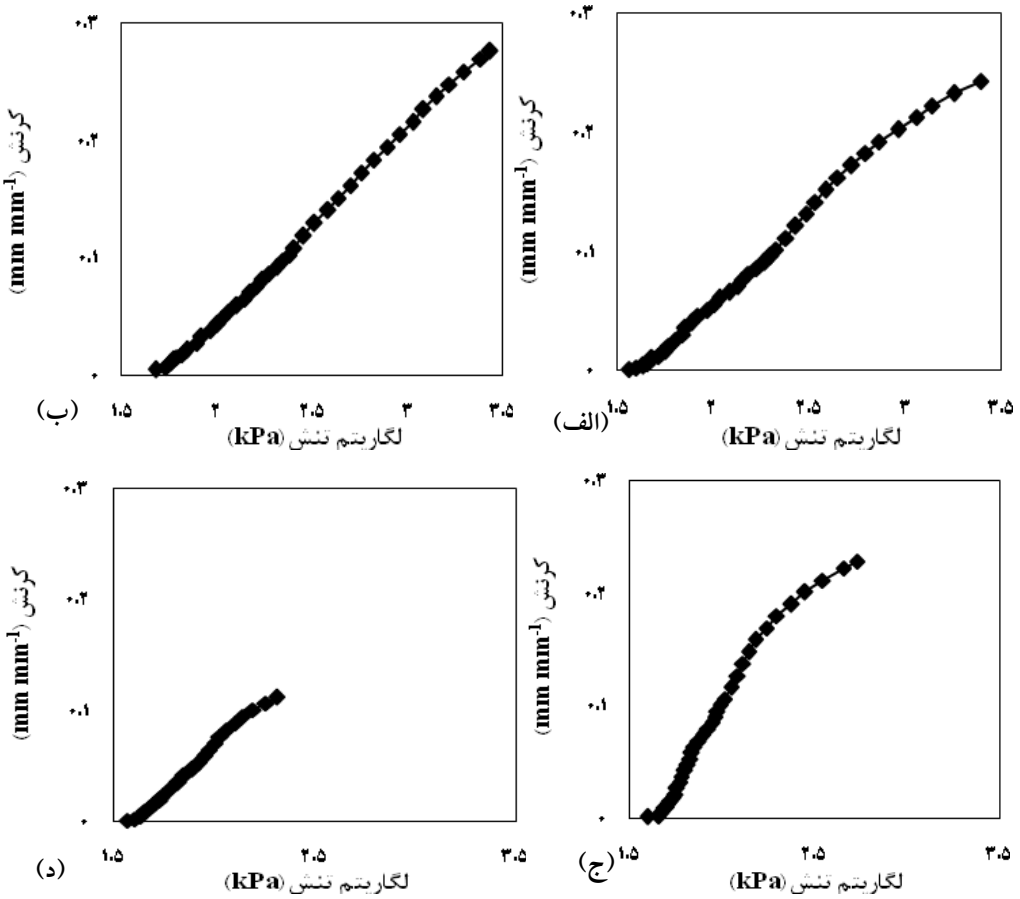
شکل ۲. نمونه‌هایی از نمودار لگاریتم تنش-نشست خاک رس سیلتی در آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) بدون بار متراکم‌کننده، الف) رطوبت ۰/۹PL بدون تروخشک شدن، ب) رطوبت ۰/۹PL با تروخشک شدن، ج) رطوبت ۱/۱PL بدون تروخشک شدن و د) رطوبت ۱/۱PL با تروخشک شدن.

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

در آزمایش نشست صفحه‌ای برای تمام سطوح بار متراکم‌کننده، با افزایش مقدار رطوبت از ۰/۹PL به ۱/۱PL، مقدار بیش-تخمینی تنش پیش-تراکمی برآورد شده‌ی خاک، کاهش یافت (شکل۴ (الف)). تنش پیش-تراکمی براساس تنش مؤثر (Effective stress) تعریف می‌شود، ولی در این پژوهش به‌علت این‌که تغییرات فشار آب منفذی در حین آزمایش اندازه‌گیری نشد، تنش پیش-تراکمی بر حسب تنش کل (Total stress) بیان شد. بنابراین، مقادیر محاسبه شده را می‌توان تنش پیش‌تراکمی ظاهری (Apparent pre-compaction stress) نامید. مقادیر تنش پیش‌تراکمی درحالت بدون بار متراکم‌کننده می‌تواند به‌دلیل تشکیل پیوندهای آبی (هلال‌های آبی) بین ذرات خاک در مدت ۲۴ ساعت، نگه داشتن نمونه‌ها باشد. تروخشک شدن خاک سبب افزایش بیش-تخمینی تنش پیش‌تراکمی برآورد شده گردید (شکل۴ (ب)). زیرا هنگامی که خاک تحت چرخه‌های تروخشک قرار می‌گیرد، خاکدانه‌ها در محل تماسشان به‌هم می‌پیوندند (۶) و موجب افزایش چگالی ظاهری (BD) خاک از ۱/۲۰ به ۱/۳۰ سانتی‌متر مکعب شد و در نتیجه مقاومت فشاری (تنش پیش-تراکمی) خاک افزایش یافت. بنابراین، فرآیند تروخشک شدن خاک، موجب بیش-تخمینی در برآورد تنش پیش-تراکمی ظاهری شد (تعیین‌شده با آزمایش نشست

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]



شکل۳. نمونه‌هایی از نمودار لگاریتم تنش-نشست خاک رس سیلتی در آزمایش فشردگی محصور (CCT)، بدون بار متراکم‌کننده، الف) رطوبت ۰/۹PL بدون تروخشک شدن، ب) رطوبت ۰/۹PL با تروخشک شدن، ج) رطوبت ۱/۱PL بدون تروخشک شدن و د) رطوبت ۱/۱PL با تروخشک شدن.

صفحه‌ای) که این افزایش در حالت مرطوب (۰/۹PL) بیشتر از حالت خیس (۱/۱PL) می‌باشد (جدول۳).

نتایج آزمون t جفت‌شده نشان داد که برای حالت بدون تروخشک شدن، در هر دو سطح بار متراکم‌کننده (۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال)، اختلاف معنی‌داری بین بار وارد شده به نمونه و مقادیر برآورد شده از آزمایش PST وجود نداشت. پس می‌توان برای خاک‌های خاک‌ورزی‌شده به‌منظور تعیین پارامترهای تراکمی آن، از این روش به‌عنوان یک روش سریع و قابل اجرا در آزمایشگاه و مزرعه استفاده نمود. درصورتی‌که برای خاک تروخشک شده، مقادیر برآورد شده به‌طور معنی‌داری بیشتر از بار متراکم‌کننده‌ی خاک بود.

در آزمایش فشردگی محصور (CCT)، در هرسطح بار متراکم‌کننده (۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال)، تنش پیش-تراکمی برآورد شده در رطوبت‌های ۰/۹PL و ۱/۱PL، به‌ترتیب بیش و کم-تخمینی داشت (شکل۵ (الف)). تروخشک شدن خاک نسبت‌به حالت بدون تروخشک شدن در سطح بار ۲۰۰ کیلوپاسکال، سبب کاهش بیش-تخمینی تنش پیش-تراکمی برآوردشده گردید، اما در بار متراکم‌کننده‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال، بیش-تخمینی تنش پیش-تراکمی با تروخشک شدن به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل۵ (ب)). نتایج آزمون t جفت‌شده در آزمایش CCT، نشان داد که در هر دو حالت با و بدون تروخشک شدن، برای بار متراکم‌کننده ۱۰۰ کیلوپاسکال، اختلاف معنی‌داری بین بار وارده و مقادیر برآوردشده وجود نداشت، اما در بار متراکم‌کننده‌ی ۲۰۰ کیلوپاسکال، این اختلاف معنی‌دار بود. بنابراین این روش نمی‌تواند در بارهایی که موجب نزدیک‌شدن حالت خاک به اشباع می‌شود، برآورد صحیحی داشته باشد.

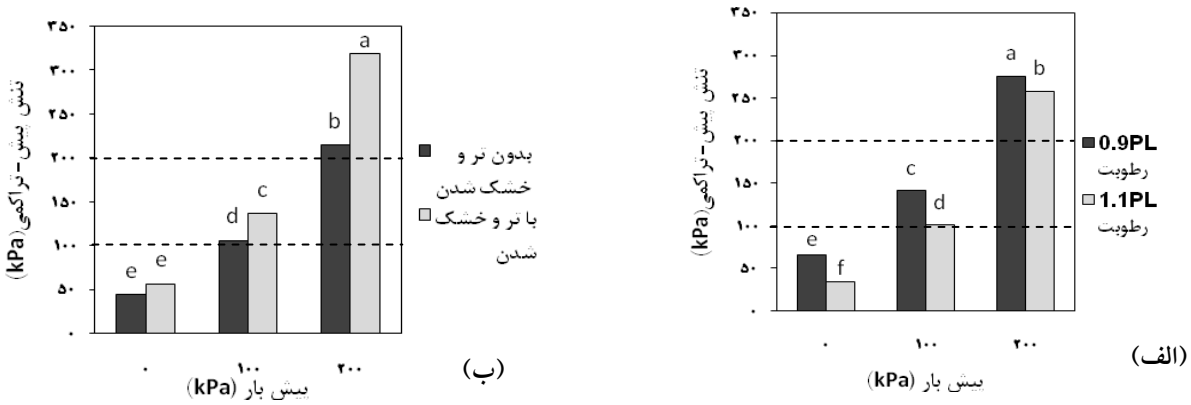
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]

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

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

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



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

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

در شکل ۶ رابطه‌ی بین تنش پیش-تراکمی به‌دست آمده از روش‌های PST و CCT نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رابطه معنی‌داری بین آن‌ها دیده نمی‌شود. در این خاک، به‌دلیل اشباع شدن سریع نمونه طی آزمایش CCT، مقادیر به‌دست آمده با بار متراکم‌کننده‌ی اولیه هم‌خوانی ندارد. در نتیجه، این روش نمی‌تواند به‌عنوان روشی مناسب برای تخمین ظرفیت باربری این خاک، استفاده شود.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]

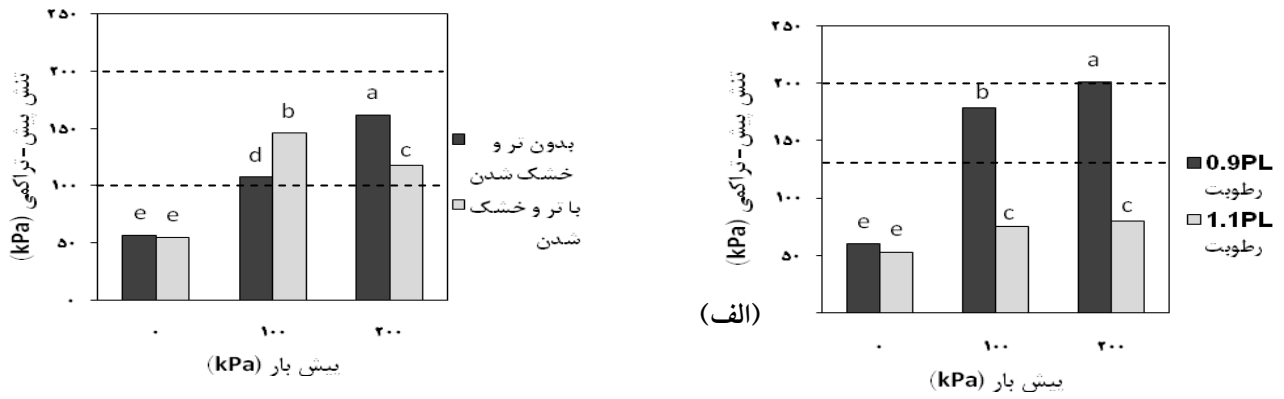
جدول ۳. اثر متقابل رطوبت، بار متراکم‌کننده و تروخشک شدن بر تنش پیش-تراکمی (kPa) در آزمایش PST

پیش‌بار (kPa)	رطوبت			
	۰/۹PL		۱/۱PL	
	بدون تروخشک شدن	با تروخشک شدن	بدون تروخشک شدن	با تروخشک شدن
۰	۶۱/۹^{fg}±۴/۶$^{+}$	۶۹/۳^{f}±۴/۱	۲۶/۱^{h}±۱/۲	۴۳/۵^{gh}±۳/۹
۱۰۰	۱۱۶/۲^{e}±۰/۸	۱۶۶/۹^{d}±۱۶/۳	۹۵/۷^{e}±۹/۵	۱۰۶/۷^{e}±۵/۸
۲۰۰	۲۱۳/۴^{c}±۱۱/۹	۳۳۸/۳^{a}±۱۰/۴	۲۱۷/۰^{c}±۱۱/۷	۲۹۸/۹^{b}±۳/۵

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

+ارقام پس از ± انحراف استاندارد می‌باشد.

PL: حد خمیری خاک.



شکل۵. الف) اثر متقابل رطوبت و بار متراکم‌کننده و ب) اثر متقابل تروخشک شدن و بار متراکم‌کننده بر تنش پیش-تراکمی در آزمایش CCT (تعیین‌شده به‌روش کاساگراند). میانگین‌های دارای حروف مشابه، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ براساس آزمون LSD ندارند.

جدول۴. اثر متقابل رطوبت، بار متراکم‌کننده و تروخشک شدن بر تنش پیش-تراکمی(kPa) در آزمایش CCT

پیش بار (kPa)	رطوبت			
	۰/۹PL		۱/۱PL	
	بدون تروخشک شدن	با تروخشک شدن	بدون تروخشک شدن	با تروخشک شدن
۰	۶۵/۴^{efj}±۵/۷$^{+}$	۶۱/۵^{jhi}±۲/۳	۴۸/۸^{i}±۰/۶	۴۹/۳^{i}±۳/۲
۱۰۰	۱۴۲/۰^{c}±۳/۷	۲۱۵/۵^{a}±۴/۹	۷۳/۸^{efj}±۸/۹	۷۷/۱^{ef}±۷/۹
۲۰۰	۲۲۳/۴^{a}±۶/۸	۱۷۸/۵^{b}±۱/۶	۱۰۱/۴^{d}±۰/۶	۵۷/۸^{hi}±۱/۲

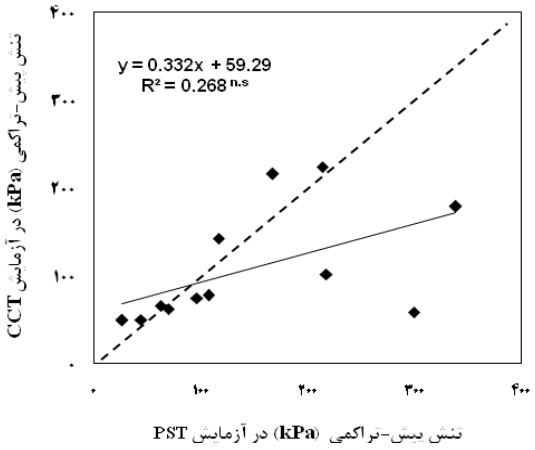
میانگین‌های که در یک حرف لاتین مشترک‌اند، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ براساس آزمون LSD ندارند.

+ارقام پس از ± انحراف استاندارد می‌باشد.

PL: حد خمیری خاک.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]



شکل۶. رابطه‌ی بین میانگین مقادیر تنش پیش-تراکمی به‌دست آمده از روش کاساگراند در آزمایش‌های CCT و PST.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر چرخه‌های تروخشک شدن بر برآورد تنش پیش-تراکمی یک خاک ریزبافت با استفاده از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای(PST) و فشردگی محصور (CCT) مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه‌های بازسازی‌شده و بدون چرخه‌های تروخشک شدن، برآورد تنش پیش-تراکمی ظاهری با استفاده از آزمایش PST با مقدار پیش‌بار اعمالی هم‌خوانی داشت. بنابراین، از آزمایش PST می‌توان برای خاک‌های کشاورزی به‌عنوان یک روش سریع و قابل اجرا برای تعیین ظرفیت باریری خاک‌های خاک‌ورزی شده استفاده نمود. با افزایش مقدار رطوبت از ۰/۹ حد خمیری (PL) به PL ۱/۱، مقدار بیش-تخمینی تنش پیش-تراکمی ظاهری خاک کاهش یافت. در یک سطح رطوبتی معین، فرآیند تروخشک شدن موجب بیش-تخمینی مقادیر تنش پیش-تراکمی برآوردشده گردید. بنابراین، استفاده از ایده‌ی تنش پیش-تراکمی برای تعیین ظرفیت باربری خاک‌ها که در اثر فرآیند تروخشک شدن ساختار آنها تغییر می‌کند، عملی نیست. استفاده از آزمایش CCT به‌علت اشباع‌شدن سریع خاک‌های ریزبافت در حین آزمایش، روش مناسبی برای تعیین ظرفیت باربری این گونه خاک‌ها نمی‌باشد.

منابع مورد استفاده

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-10-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.5.4]