ارزیابی روش‌های تخمین تنش پیش‌تراکمی خاک‌های تیمار شده با کودهای آلی با استفاده از نتایج آزمایش‌های نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور

ناهید عقیلی ناطق، عباس همت* و مرتصی صادقی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۶/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۸/۸)

چکیده

یکی از فراسنجه‌های مکانیکی مهم در تعیین تنش مجاز برای جلوگیری از تراکم خاک، تنش پیش‌تراکمی (s_{pc}) یا تنش در آستانه تراکم است. اگر تنش وارد شده به خاک در اثر تردد ماشین‌های کشاورزی کمتر از s_{pc} باشد، احتمال تغییر شکل ماندگار در خاک کم است. در این پژوهش، برای تعیین s_{pc} نمونه‌های بازسازی شده از خاک لایه رویین در یک طرح کودی درازـ مدت، از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT) استفاده شد. در طرح کودی، کودهای آلی (لجن فاضلاب، کمپوست و کود گاوی) در سه سطح (۲۵، ۵۰ و۱۰۰ 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. تأثیر تیمارهای کودی و رطوبت (۱۷/۱ و ۲۰/۹ درصد وزنی) بر تنش پیش‌تراکمی خاک با دو طرح فاکتوریل و مقایسه اورتوگونال در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار بررسی گردید. تنش پیش‌تراکمی با سه روش کاساگراند، نقطه بیشینه انحنا و تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها در کرنش صفر از منحنی‌های فشردگی خاک تعیین گردید. مقادیر s_{pc} برآورد شده برای تیمارهایی که با کودها آلی تیمار شده بودند بیش تخمینی داشتند و این بیش تخمینی در هر دو آزمایش با افزایش مقدار کودآلی افزایش یافت، ولی این بیش تخمینی در آزمایش CCT بیشتر از آزمایش PST بود. بنابراین، می‌توان بیان نمود که نتایج به دست آمده از آزمایش PST برای برآورد تنش پیش‌تراکمی خاک مطمئن‌تر است. مقادیر s_{pc} تخمین زده شده با هر یک از سه روش بستگی به تیمار کودی و رطوبت اولیه نمونه خاک داشت. برای تعیین تنش در آستانه تراکم خاک‌های تیمار نشده با کودهای آلی (شاهد و تیمار کود شیمیایی) و یا تیمار شده با مقدار کم کودهای آلی (۲۵ تن در هکتار)، استفاده از آزمایش PST و به کارگیری روش کاساگراند را می‌توان توصیه نمود. در صورتی که برای خاک‌های تیمار شده با مقادیر زیاد کودهای آلی (۵۰ و۱۰۰ تن در هکتار)، استفاده از آزمایش PST و به کارگیری روش نقطه بیشینه انحنا را می‌توان پیشنهاد کرد.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، تنش پیش‌تراکمی، آزمایش فشردگی محصور، آزمایش نشست صفحه‌ای، کودهای آلی

۱. به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، استاد و استادیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

مقدمه

هنگامی که بار مکانیکی به سطح خاکی در مزرعه وارد می‌شود و منجر به هیچ گونه فرورفتگی نمی‌شود، می‌توان با اطمینان فرض نمود که هیچ گونه تراکمی رخ نداده است. با افزایش بار، یک بار آستانه‌ای وجود دارد که منجر به فرورفتگی و بنابراین تراکم می‌شود. استفاده از تنش پیش‌تراکمی (Precompaction stress; σ_{pc}) به عنوان معیاری از بار آستانه‌ای، به طور وسیع پذیرفته شده است. به عنوان مثال، وسبرینک و هورن از تنش پیش‌تراکمی برای ارزیابی تأثیر روش‌های مکانیزه برداشت چوب بر تراکم‌پذیری خاک‌های جنگل استفاده نمودند (۱۷).

تنش پیش‌تراکمی(σ_{pc}) خاک را معمولاً با اندازه‌گیری اثر تنش فشاری بر فراسنجه‌های حجمی خاک تعیین می‌نمایند. این مشخصه معمولاً با رسم نسبت پوکی (e) یا کرنش عمودی (e) خاک در برابر لگاریتم تنش فشاری عمودیبه دست می‌آید (شکل ۱). این منحنی دارای دو ناحیه مجزاست که رفتار کشسان در تنش‌های پایین (خط تراکم مجدد ;Recompression line: RL) و تغییر شکل ماندگار (خط فشردگی بکر Virgin compression ; line: VCL) در تنش‌های بالاتر را نشان می‌دهد. نقطه‌ای (تنش) از منحنی که مشخص‌کننده تغییر در رفتار کشسان به تغییر شکل ماندگار است، تنش پیش‌تراکمی (σ_{pc}) در نظر گرفته می‌شود (۴ و ۶). برای تعیین تنش پیش‌تراکمی از آزمایش‌های تحکیم سنجی (استفاده از ادومتر ;Oedometer)، فشردگی محصور(Confined compression test; CCT) و نشست صفحه‌ای (Plate sinkage test; PST) استفاده می‌گردد.

در آزمایش فشردگی محصور (CCT)، خاک در درون یک سیلندر صلب توسط یک پیستون متحرک به سمت پایین متراکم شده و تنش روی پیستون و تغییر حجم خاک به طور پیوسته ثبت می‌شود. خروج آب از خاک به عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته می‌شود. این آزمایش به‌طور وسیعی توسط مهندسین کشاورزی و خاک‌شناسی به‌عنوان روش آسان و سریع بررسی تراکم‌پذیری و تنش پیش‌تراکمی خاک‌ها استفاده می‌گردد. نتایج این آزمایش، منحنی تنش- کرنش خاک در حالت غیر اشباع را بیان می‌کند و کرنش حجمی ایجاد شده به دلیل خروج هوا از خاک است (۱۳).

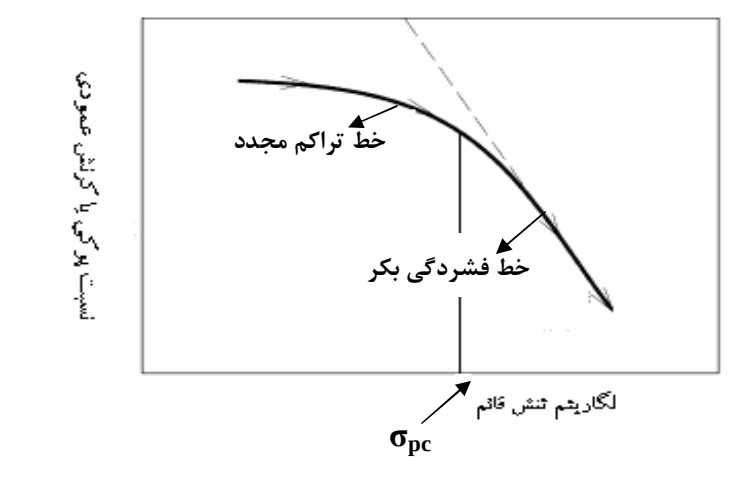
آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری تنش پیش‌تراکمی(σ_{pc}) خاک است. در مهندسی پی، آزمایش PST به‌عنوان یک روش غیر مستقیم برای تعیین ظرفیت باربری خاک در محل استفاده می‌شود (۱۸). در این آزمایش، بر یک صفحه صلب قرار گرفته روی سطح خاک، بارگذاری عمودی انجام می‌شود و نشست عمودی صفحه اندازه‌گیری شده و منحنی بار- نشست رسم می‌گردد که چگونگی رفتار خاک در برابر تنش عمودی را نشان می‌دهد (۳).

چندین روش برای تعیین σ_{pc} از منحنی‌های حاصل از آزمایش‌های فشردگی وجود دارد که عبارت‌اند از: روش‌های کاساگراند (۵)، اشمرتمن (۱۶)، سالفورز (۱۵)، جوس و همکاران (۱۰)، لیبرت و هورن (۱۴)، دایاس جونیور و پیرس (۸) و الکساندرو و ارل (۳). رایج‌ترین روش برای تعیین تنش پیش‌تراکمی، روش نموداری کاساگراند (۱۹۳۶) است که روشی را برای یافتن حداکثر تنش گذشته ارائه کرده و براساس منحنی نسبت پوکی- لگاریتم تنش عمودی تعیین می‌شود (۵). در نقطه‌ای که انحنای منحنی حداکثر است (نقطه D در شکل۲)، مماسی بر منحنی رسم شده و نیم‌ساز زاویه بین این مماس و خط افقی مار بر D ترسیم می‌گردد، نقطه برخورد این نیم‌ساز با امتداد مستقیم‌الخط نمودار VCL نشان‌دهنده حداکثر تنش مؤثری است که در گذشته بر خاک وارد آمده است که آن را تنش پیش‌تراکمی (σ_{pc}) می‌نامند. این روش به‌عنوان یک روش استاندارد شناخته می‌شود، هرچند ممکن است در شرایط خاص با روش‌های ساده‌تر یا بهتر جایگزین شود (۸).

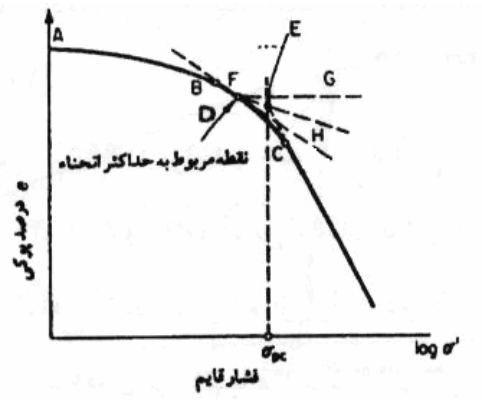
مشکل روش ترسیمی کاساگراند، تعیین نقطه مطابق با کمترین شعاع انحنا روی منحنی تراکم است (۱۱). منحنی‌های تراکم، اغلب خمیدگی تیز مشخصی را بین خط تراکم مجدد و خط فشردگی بکر نشان نمی‌دهند و اشتباه کمی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]



شکل ۱. ویژگی‌های منحنی مشخصه فشردگی خاک (رابطه نسبت پوکی(e) یا کرنش عمودی (ε) خاک با تنش فشاری. S_{pc} تنش پیش‌تراکمی است (۹).



شکل۲. یافتن تنش پیش‌تراکمی به‌روش کاساگراند (۵).

در اندازه‌گیری‌ها، اثر خیلی زیادی بر موقعیت نقطه مطابق با کمترین شعاع انحنا دارد. بنابراین برای تعیین سریع و بدون قضاوت شخصی این نقطه، روش‌های ریاضی مناسب است (۱۱). داویدوسکی و کولن روش نموداری کاساگراند را به صورت یک مدل کامپیوتری برای تعیین σ_{pc} ارائه نمودند. در این مدل تمامی مراحل تعیین نقاط و امتدادهای مهم برای تخمین σ_{pc} با استفاده از روش‌های ریاضی و مشتق‌گیری انجام می‌شود و داده‌های خام ابتدا فیلتر می‌شوند تا هر گونه نایک‌نواختی در اثر خطای آزمایشی و غیره سرشکن شود (۷).

روش اشمرتمن تا حدودی نزدیک به روش کاساگراند است، با این تفاوت که تأثیر به‌هم‌خوردگی خاک در هنگام نمونه‌گیری را تصحیح می‌کند (۱۶). در روش سالفورز با رسم کرنش در برابر تنش، σ_{pc} تخمین زده می‌شود (۱۵). در روش جوس و همکاران با ترسیم لگاریتم تنش در برابر کرنش و برازش دو امتداد مناسب بر خط فشردگی بکر (VCL) و ناحیه کشسان (ناحیه فوق تراکم)، تخمینی از σ_{pc} به‌دست می‌دهد (۱۰). در روش لبرت و هورن (۱۴) مقدار σ_{pc} نیز براساس برازش دو خط بر ناحیه VCL و ناحیه فوق تراکم تعریف شده که مکان تلاقی آنها σ_{pc} را نشان می‌دهد.

در روش پیشنهادی دایاس جونیور و پیرس، چهار شیوه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

تخمین σ_{pc} وجود دارد که از تقاطع خط گذرنده از اولین دو نقطه، سه نقطه، چهار نقطه یا پنج نقطه متوالی منحنی تنش- کرنش در بخش کشسان (ناحیه فوق تراکم) و امتداد VCL تعیین می‌شود (۸). آرویدسون و کلر پنج روش را برای تعیین σ_{pc} براساس منحنی کرنش برحسب لگاریتم تنش مقایسه نمودند که به‌ترتیب عبارت بودند از: ۱) روش کاساگراند، ۲) تقاطع خط فشردگی بکر (VCL) با محور xهادر نقطه کرنش صفر، ۳) تنش خاک در کرنش از پیش تعیین شده (۲/۵ درصد کرنش)، ۴) تقاطع خط VCL و خط حاصل از رگرسیون دو نقطه اول منحنی و ۵) تقاطع خط VCL و خط حاصل از رگرسیون سه نقطه اول منحنی. روش‌های ۲، ۴و ۵ به وسیله دایاس جونیور و پیرس و روش ۲ توسط اشمرتمن و مکبراید و جوس پیشنهاد شده است (۴).

گرگوری و همکاران با کمک مدل‌های ریاضی برازش شده بر منحنی تنش ـ کرنش به تخمین تنش پیش‌تراکمی با روش‌های کاساگراند، نقطه بیشینه انحنا و تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها پرداختند (۹). هم‌چنین کاوالیری و همکاران با ارائه مدل ریاضی برازش شده بر منحنی لگاریتم تنش - کرنش، تنش پیش‌تراکمی را تخمین زدند (۶).

هدف از این پژوهش، مقایسه مقادیر تنش پیش‌تراکمی به‌دست آمده برای نمونه‌های خاک تیمار شده با مقادیر متفاوت انواع کود آلی و در دو سطح رطوبتی با روش‌های کاساگراند، نقطه بیشینه انحنا و تقاطع خط فشردگی بکر (VCL) با محور xها در کرنش صفر با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور بود.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک و تیمارهای کودی

نمونه‌های خاک از یک طرح پژوهشی کودهای آلی که در مزرعه پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان واقع در لورک نجف آباد اجرا شده بود، تهیه شدند. این مزرعه 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 غالب خاک که به صورت کیفی تعیین شدند عبارت‌اند از: میکا/ایلیت، پلی‌گورسکایت، کائولینیت، کلریت، کوارتز و مقدار جزیی اسمکتیت؛ کانی‌های غالب شامل پلی‌گورسکایت و کلریت می‌باشد. برخی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی خاک در جدول ۱ آورده شده است.

نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری از تیمارهایی که ۷ سال پیاپی کود داده شده بود، تهیه شدند. طرح آزمایشی در مزرعه به صورت کرت‌های نواری بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور: الف- نوع کود شامل: ۱) شاهد (بدون کود)، ۲) کمپوست، ۳) لجن‌فاضلاب، ۴) کود دامی و ۵) کود شیمیایی و ب- مقدار کودهای آلی (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار) در سه تکرار اجرا شد. تناوب زراعی محصول در طول اجرای طرح گندم- ذرت علوفه‌ای بود. کودهای آلی سالانه یک بار در پاییز هنگام آماده‌سازی زمین جهت کاشت گندم به زمین داده شد. در تیمار کود شیمیایی، ۲۵۰ کیلوگرم فسفات آمونیوم (۱۷% N و ۴۶% P_2O_5) در هکتار کود در هنگام آماده‌سازی زمین برای گندم و ذرت (کشت گندم در پاییز و ذرت علوفه‌ای در اواسط تابستان بود) با آخرین دیسک با خاک مخلوط شده بود. در این تیمار، ۲۵۰ کیلوگرم اوره (۴۶% N) در هکتار، به‌صورت سرک برای گندم و ذرت استفاده شده بود. ویژگی‌های کودهای آلی مورد استفاده در طرح در جدول ۲ آورده شده است.

روش تهیه نمونه‌های خاک

پس از عبور خاک هوا خشک از الک ۲ میلی‌متری و با داشتن حجم ظرف (قطر ۲۵/۵ و ارتفاع ۸ سانتی‌متر) و چگالی ظاهری مرطوب ۱/۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب و درصد رطوبت مورد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک شاهد

بافت خاک	درصد ذرات اولیه				حدود پایداری		
	شن	سیلت	رس	(%)OC	SL	PL	LL
لوم رسی سیلتی	۴۶	۱۴	۴۰	۰/۵	۷	۱۹	۳۰/۱

SL، PL و LL به ترتیب درصد وزنی رطوبت خاک خشک در حد انقباض، خمیری و روانی می‌باشد.

OC: کربن آلی خاک

جدول ۲. 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

pH و هدایت الکتریکی هر دو در عصاره ۱:۵ اندازه‌گیری شدند.

[+]: درصد وزنی

نظر، مقدار خاک و آب مورد نیاز برای رساندن رطوبت نمونه‌ها به دو سطح رطوبت وزنی (۱۷/۹ و ۲۰/۱ درصد) محاسبه شد. خاک مرطوب با افشان کردن آب به‌طور یک‌نواخت تهیه گردید. مقدار آب لازم پس از محاسبه به خاک، توسط یک آب‌پاش به‌صورت افشان بر خاک پاشیده و خاک به‌مدت ۴۵ دقیقه ورز داده شد. سپس خاک مرطوب به‌صورت لایه لایه (سه لایه۲/۷ سانتی‌متری) در ظرف ریخته شد تا فشردگی یک‌نواختی با عمق نمونه به‌دست آید. در هر لایه با ضربه‌های آهسته خاک فشرده گردید و چگالی ظاهری مرطوب خاک به مقدار ۱/۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب رسانده شد. سعی شد تغییرات چگالی ظاهری تر با عمق ظرف به حداقل برسد. پیش از اضافه کردن لایه جدید، شیارهایی در سطح لایه پیشین ایجاد شد تا پیوستگی بین لایه‌ها ایجاد شود.

به‌منظور ایجاد نمونه‌های خاک با یک سطح تنش پیش‌تراکمی اولیه، ابتدا خاک پیش‌بارگذاری شد. در تمامی این آزمایش‌ها خاک به‌وسیله دستگاه CBR (California Bearing Ratio) تحت پیش‌بار قرار گرفت (۲). برای این منظور صفحه‌ای سوراخ‌دار با قطر ۲۵ سانتی‌متر روی ظرف قرار داده شد و توسط پیستون دستگاه CBR باری برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه وارد گردید. پس از رسیدن بار به حد مورد نظر نمونه به مدت ۳۰ دقیقه تحت بار باقی ماند و سپس آزمایش‌های مربوطه انجام شد.

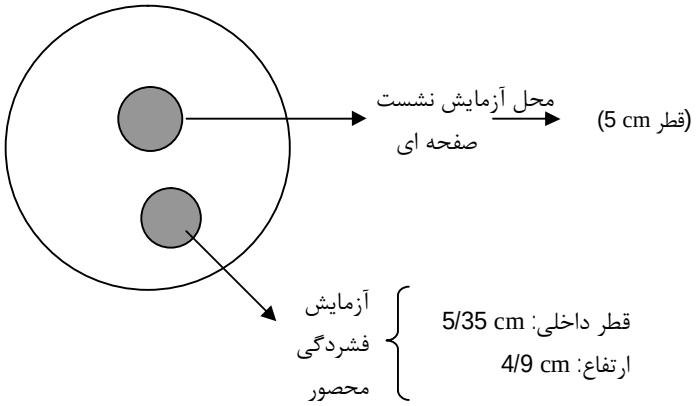
روش بارگذاری و شرایط آزمایش

پس از پیش‌بارگذاری، فوراً آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) در مرکز نمونه پیش‌بارگذاری شده انجام شد. در آزمایش PST، بارگذاری بر سطح خاک با استفاده از یک صفحه فلزی صلب با قطر ۵ سانتی‌متر و با ضخامت ۵ میلی‌متر با دستگاه CBR با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد (شکل۳). به ازای هر ۰/۵ میلی‌متر نشست، مقدار بار وارده با استفاده از نیروسنج (حلقه گواه) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر قرائت و منحنی بار - نشست رسم گردید. نشست ۲۰ میلی‌متر به‌عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته شد (۱).

پس از پایان آزمایش نشست صفحه‌ای، یک نمونه با قطر داخلی ۵۳/۵ و ارتفاع ۴۹ میلی‌متر برای انجام آزمایش فشردگی محصور (CCT) تهیه شد (شکل۳). در آزمایش CCT جدار

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]



شکل۳. نمای بالای ظرف آزمایش و مکان آزمایش PST و تهیه نمونه جهت آزمایش فشردگی محصور (CCT)

داخلی سیلندر نمونه‌برداری 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 پیش از بارگذاری قرار داده شد. اعمال بار بر نمونه توسط سیلندر دستگاه CBR، با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید. بار وارده بر خاک در فواصل جابه‌جایی ۰/۵ 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 (۱۲).

برازش منحنی فشردگی خاک با توابع ریاضی

به منظور افزایش دقت در پیدا نمودن نقطه با بیشینه انحناء و استخراج تنش پیش‌تراکمی از منحنی‌های آزمایش‌های فشردگی، از برازش معادلات با نرم‌افزار MatLab بر داده‌های لگاریتم تنش - کرنش حاصل از آزمایش فشردگی محصور و داده‌های لگاریتم تنش - نشست حاصل از آزمایش نشست صفحه‌ای استفاده شد. معادلات چندجمله‌ای معکوس درجه دو (معادله۱)، نمایی (معادله ۲) و چندجمله‌ای درجه چهار (معادله ۳) بر داده‌های لگاریتم تنش - نشست ($\log s - s$) و معادلات چندجمله‌ای درجه چهار (معادله ۴)، لوجیستیک (معادله ۵) و گامپرتز (معادله ۶) بر داده‌های لگاریتم تنش- کرنش ($\log s - e$) برازش داده شدند:

$$s = a[1 + b(\log s) + c(\log s)^2]^{-1} \quad [1]$$

$$s = \exp\left(a + b(\log s) + c(\log s)^2\right) \quad [2]$$

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

$$e = a(\log s)^4 + b(\log s)^3 + c(\log s)^2 + f(\log s) + g \quad [4]$$

$$e = a + c[1 + \exp(b((\log_{10} s) - m))]^{-1} \quad [5]$$

$$e = a + c\exp[-\exp(b((\log_{10} s) - m))] \quad [6]$$

که در این معادله‌ها a، b، c، f، g و m فراسنجه‌های برازش هستند. سه منحنی برازش شده بر داده‌های لگاریتم تنش-کرنش حاصل از آزمایش CCT توسط گرگوری و همکاران (۹) ارائه گردیده بود. به دلیل عدم دسترسی به معادلات پیشنهادی در منابع برای برازش بر داده‌های حاصل از آزمایش PST، در این تحقیق، چندین منحنی بر داده‌های لگاریتم تنش - نشست توسط برنامه Data fitt موجود در نرم‌افزار MatLab برازش شد و در نهایت از منحنی‌های به دست آمده سه منحنی را که بیشترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) را داشتند به عنوان منحنی‌های مناسب انتخاب شدند. اگرچه ۳ مدل ذکر شده در بالا بر داده‌های تجربی برازش خوبی نشان دادند، ولی از بین سه مدل برازش شده برداده‌های آزمایش PST و CCT با توجه به بالاترین

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

ضریب تبیین (R^2) و کمترین انحراف استاندارد (RMSE)، مدل چندجمله‌ای درجه چهار به عنوان بهترین مدل انتخاب و مبنای تجزیه و تحلیل‌های بعدی قرار گرفت.

روش‌های تعیین تنش پیش تراکمی

تنش پیش‌تراکمی با روش‌های کاساگراند، نقطه بیشینه انحناء و تقاطع خط فشردگی بکر (VCL) با محور xها در کرنش صفر، بر هر یک از منحنی‌های برازش شده، با استفاده از برنامه‌نویسی در MatLab تعیین شدند. در شکل‌های ۴ و ۵ نمونه‌هایی از روش تعیین تنش پیش‌تراکمی در آزمایش‌های PST و CCT با استفاده از سه روش مذکور نشان داده شده است. به علت وجود بیش ـ تخمینی در تنش پیش‌تراکمی در صورت استفاده از کل دامنه داده‌های آزمایش نشست صفحه‌ای، برای محاسبه تنش پیش‌تراکمی از داده‌های تجربی تا نشست ۵ میلی متر استفاده شد.

تجزیه و تحلیل آماری

برای بررسی تأثیر عوامل آزمایش بر فراسنجه‌های اندازه‌گیری شده از دو طرح آماری مجزا: ۱- طرح فاکتوریل ۳×۳×۲ (مقدار کود × نوع کود × رطوبت) و ۲- مقایسه گروهی (۱- کودشیمیایی در دو رطوبت، ۲- شاهد در دو رطوبت، ۳- شاهد با کودهای شیمیایی و ۴- شاهد وکودهای شیمیایی در مقابل بخش فاکتوریل) در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار استفاده شد. برای بررسی اثر نوع آزمایش بر تنش پیش تراکمی از آزمون t جفت شده استفاده گردید. برای مقایسه روش‌های تعیین تنش پیش‌تراکمی در هریک از آزمایش‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵% استفاده به عمل آمد. برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS استفاده شد.

نتایج و بحث

در هر سطح رطوبتی و برای هر نوع کود، مقادیر برآورده شده تنش پیش‌تراکمی با افزایش مقدار کود افزوده شده به خاک افزایش یافت (جدول‌های ۳ و ۴). به علت بیش تخمینی ها، تنش پیش تراکمی برآورد شده، تنش پیش‌تراکمی ظاهری محسوب می شود و در نتیجه بیشتر از پیش بار خارجی وارده به خاک است. برای هر تیمار کودی، با افزایش درصد رطوبت وزنی خاک از ۱۷/۱به ۲۰/۹، مقدار تنش پیش‌تراکمی کاهش یافت.

مقایسه مقادیر تنش پیش‌تراکمی تعیین شده با آزمایش‌های PST و CCT

در رطوبت وزنی ۱۷/۱ درصد (جدول ۳)، اگر چه مقادیر تنش پیش‌تراکمی تخمین زده شده با روش کاساگراند در آزمایش CCT بیشتر از PST است، ولی به دلیل زیاد بودن انحراف معیار مقادیر در آزمایش CCT، تفاوت مقادیر در این دو روش در اکثر موارد معنی‌دار نبود. در روش نقطه بیشینه انحنا، فقط در ۶ مورد (کمپوست ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار، کود گاوی ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار و تیمار کود شیمیایی) مقادیر تنش پیش‌تراکمی به‌دست آمده با آزمایش CCT به طور معنی‌داری بیشتر از مقادیر به دست آمده با روش PST بود. در صورتی‌که در روش تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها، فقط در دو مورد (کمپوست ۲۵ تن در هکتار و کود شیمیایی) مقادیر به دست آمده در آزمایشCCT به طور معنی‌داری بیشتر از آزمایش PST بود. بنابراین، بیش تخمینی در آزمایش CCT به روش تعیین تنش پیش‌تراکمی بستگی دارد.

در رطوبت وزنی ۲۰/۹ درصد (جدول ۴)، در روش کاساگراند فقط در تیمارهایی که ماده آلی به خاک اضافه نشده بود (تیمارهای شاهد و کود شیمیایی) و یا مقدار کمی اضافه شده بود (کمپوست و لجن فاضلاب ۲۵ تن در هکتار) مقادیر تنش پیش‌تراکمی برآورد شده با آزمایشCCT به‌طور معنی‌داری بیشتر از آزمایش PST بود. بنابراین، در رطوبت بالا (۲۰/۹ درصد) و در تیمارهایی که کودی آلی داده نشده و یا کمترین مقدار داده شده بود، با توجه به کم بودن حجم اولیه منافذ و تمایل خاک به اشباع شدن و افزایش فشار آب منفذی در حین

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

جدول۳. مقایسه مقادیر تنش پیش‌تراکمی (kPa) تعیین شده با سه روش درتمام تیمارهای کودی با رطوبت وزنی ۱۷/۱% در آزمایش‌های PST و CCT

تیمارکودی (تن در هکتار)	روش تعیین تنش پیش‌تراکمی					
	کاساگراند		نقطه بیشینه انحنا		تقاطع خط فشردگی بکر با محورxها	
	PST	CCT	PST	CCT	PST	CCT
لجن فاضلاب ۲۵	۱۶۰/۸$^{a+}$±۱۳/۶*	۲۱۲/۱^{a} ±۳۵/۴	۱۰۰/۴^{a} ±۱۲/۱	۱۶۵/۴^{a} ±۳۴/۶	۱۵۰/۳^{a} ±۱۴/۳	۱۳۸/۸^{a} ±۳۶/۳
لجن فاضلاب ۵۰	۱۷۸/۱^{a} ±۲/۴	۳۶۸/۰^{b} ±۱۷	۱۰۳^{a} ±۶/۸	۲۲۴/۲^{a} ±۸۹/۵	۱۵۷/۲^{a} ±۱/۱	۱۹۷/۷ ^{a} ±۵۶/۴
لجن فاضلاب ۱۰۰	۲۵۴/۷^{a} ±۱۵/۲	۳۱۱/۱^{a} ±۵۷/۹	۱۸۹/۹^{a} ±۱۲/۷	۲۶۱/۹^{a} ±۵۵/۱	۲۸۲/۴^{a} ±۳۹/۲	۲۵۹/۰^{a} ±۵۷/۶
کمپوست ۲۵	۱۱۳/۰^{a} ±۳/۱	۳۳۸/۲^{b} ±۴۵/۲	۸۰/۰^{a} ±۳/۲	۲۰۹/۴^{a} ±۴۲/۴	۱۰۳/۳^{a} ±۲/۹	۱۸۴/۷^{b} ±۱۰/۶
کمپوست ۵۰	۲۱۸/۵^{a} ±۸/۸	۴۲۳/۶^{b} ±۱۸/۷	۹۰/۶^{a} ±۷/۴	۳۵۴/۲^{b} ±۴۸/۶	۲۰۴/۷^{a} ±۳۳	۲۲۳/ ۹^{a} ±۲۷/۳
کمپوست۱۰۰	۲۳۵/۲^{a} ±۳۳/۸	۵۰۶/۵^{a} ±۹۴/۱	۱۱۲/۳^{a} ±۶/ ۲	۴۴۲/۲^{b} ±۴۶/۲	۲۰۶/۰^{a} ±۱۰/۲	۳۵۲/۹^{a} ±۳۹/۴
گاوی ۲۵	۱۵۴/۳^{a} ±۴/۸	۲۷۱/۱^{a} ±۲۵/۲	۱۰۷/۲^{a} ±۳/۹	۱۸۵/۱^{b} ±۱۳/۲	۱۴۰/۸^{a} ±۳/۷	۱۵۸/۹^{a} ±۲۰/۱
گاوی ۵۰	۲۳۹/۸^{a} ±۵/۹	۳۸۲/۰^{a} ±۵۲/۷	۱۱۹/۸^{a} ±۱/۷	۲۴۵/۷^{b} ±۶/۵	۲۱۹/۳^{a} ±۷/۹	۱۶۲/۴^{a} ±۲۸/۶
گاوی ۱۰۰	۲۶۰/ ۱^{a} ±۹/۹	۳۹۵/۴^{a} ±۴۱/۶	۱۴۷/۰^{a} ±۱۶/۳	۳۰۳/۹^{b} ±۲۹/۷	۲۲۰/۱^{a} ±۳/۷	۱۷۷/۲^{a} ±۹/۱
کودشیمیایی	۹۱/۹^{a} ±۴/۷	۱۶۵/۸^{b} ±۱۳/۲	۶۴/۳^{a} ±۳/۴	۱۳۲/۸^{b} ±۳/۷	۷۹/۷ ^{a} ±۱/۹	۹۶/۳^{b} ±۴/۹
شاهد	۸۵/۸^{a} ±۸	۱۳۲/۷^{a} ±۶۸/۸	۵۸/۵^{a} ±۱۰/۳	۱۴۸/۳^{a} ±۳۱/۷	۷۶/۴^{a} ±۸/۳	۸۲/۷^{a} ±۳/۴

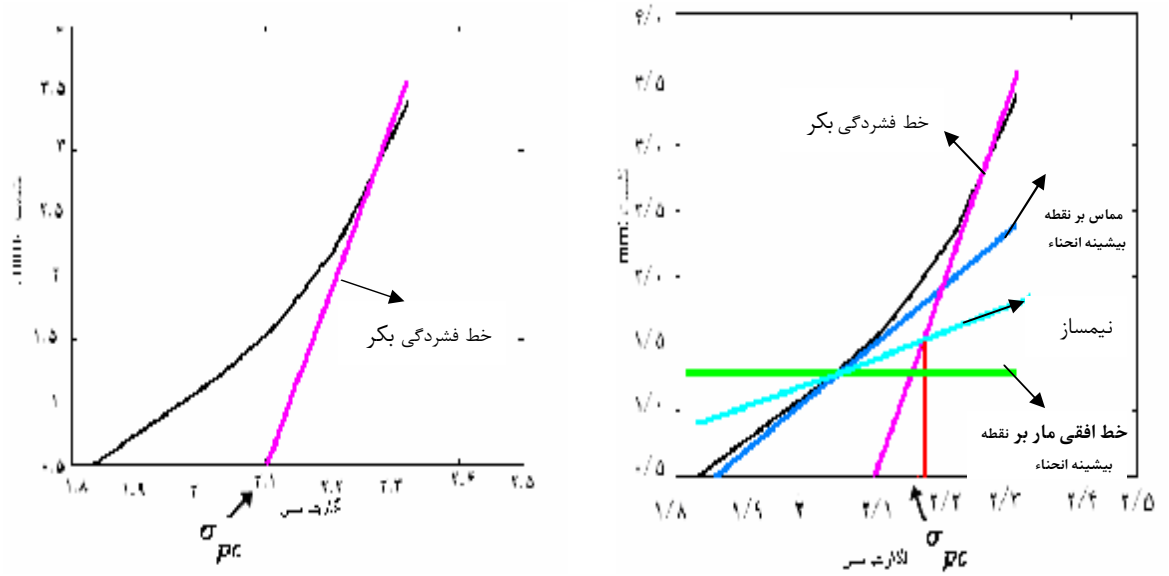
+ و * : به ترتیب میانگین و انحراف معیار می‌باشند.
حروف مشابه در هر ردیف مربوط به هر کدام از روش‌ها، نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵% بر اساس آزمون ***t*** جفت شده می باشد.

جدول۴. مقایسه مقادیر تنش پیش‌تراکمی (kPa) تعیین شده با سه روش در تمام تیمارهای کودی با رطوبت وزنی ۲۰/۹% در آزمایش‌های PST و CCT

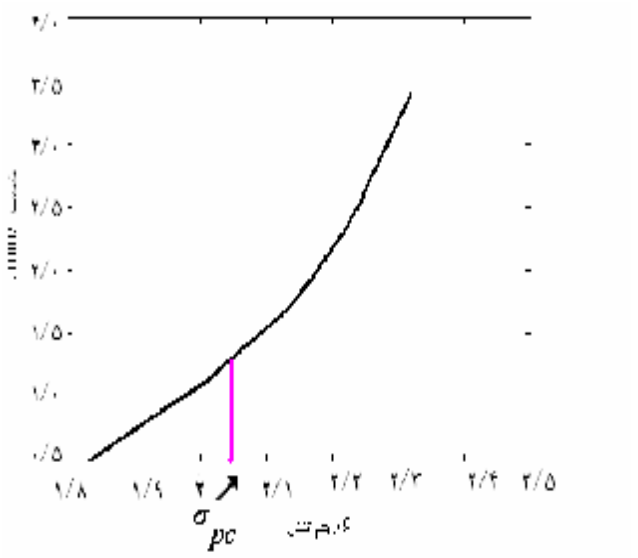
تیمارکودی (تن در هکتار)	روش تعیین تنش پیش‌تراکمی					
	کاساگراند		نقطه بیشینه انحنا		تقاطع خط فشردگی بکر با محورxها	
	PST	CCT	PST	CCT	PST	CCT
لجن فاضلاب ۲۵	۹۹/۸$^{+a}$ ±۲/۸*	۱۶۰/۳^{b} ±۸/۷	۶۸ ^{a} ±۲/۲	۱۳۳/ ۰^{a} ±۲۱/۴	۹۰/ ۲^{a} ±۲/۱	۱۰۹/۹^{a} ±۴۰/۶
لجن فاضلاب ۵۰	۱۲۴/۸ ^{a} ±۱۱/۷	۱۸۳/۵^{a} ±۴۱	۹۴/۸^{a} ±۱۳/۱	۱۳۷/۲^{a} ±۲۰/۹	۹۰/۷^{a} ±۳/۲	۱۱۶/۹^{a} ±۱۹/۹
لجن فاضلاب ۱۰۰	۱۶۱/۷^{a} ±۵۵	۱۹۳/۳^{a} ±۴۴/۸	۱۰۴/۵^{a} ±۱۷/۴۱	۱۴۵/۰^{a} ±۲۹	۱۳۶/۳^{a} ±۴۴/۳	۹۱/۶^{a} ±۳۷/۲
کمپوست ۲۵	۸۴/ ۰^{a} ±۱/۲	۱۶۰/۳^{b} ±۸/۷۷	۶۲/۵^{a} ±۶/۹	۱۳۷/۰^{a} ±۷۰/۲	۷۷/۱^{a} ±۱/۰۳	۷۱/۹^{a} ±۲/۴
کمپوست ۵۰	۱۱۲/۲^{a} ± ۱۷/۹	۱۸۹/۴^{a} ±۱۱/۷	۷۲/۴^{a} ±۶/۲	۱۷۷/۹^{b} ±۱۱/۹	۱۱۳/۲^{a} ±۱۹/۱	۱۰۲/۰^{a} ±۷/۱
کمپوست۱۰۰	۱۴۰/۰^{a} ±۱۵/۳	۴۴۸/۶^{a} ±۸۸/۶	۹۷/۰^{a} ±۱۷/۳	۳۹۴/۱^{b} ±۸۳	۱۲۷/۷^{a} ±۶/۵	۱۸۸/ ۶^{a} ±۳۵/۳
گاوی ۲۵	۹۸/۱^{a} ±۲/۱	۱۷۱/۴^{a} ±۵۹/۹	۷۱/۳^{a} ±۳/۳۷	۱۶۵/ ۹^{a} ±۲۲/۹	۸۹/۲^{a} ±۲/۸	۱۲۸/۰^{a} ±۳۱/۸
گاوی ۵۰	۱۶۶/۸^{a} ±۵/۰۸	۲۳۰/۴^{a} ±۴۷/۸	۹۱/۹^{a} ±۵/۶	۱۷۳/۰^{a} ±۱۶/۲	۱۴۶/۱^{a} ±۵/۷	۱۳۹/۰^{a} ±۵۴/۱
گاوی ۱۰۰	۱۸۴/۲^{a} ±۶	۲۴۴/۲^{a} ±۳۶/۸	۱۲۶/۹^{a} ±۷/۱	۱۸۷/۱^{a} ±۲۶/۱	۱۷۶/۱^{a} ±۶/۲	۱۶۱/ ۰^{a} ±۴۲/۴
کودشیمیایی	۷۴/۱^{a} ±۷/۱	۱۴۴/۸^{b} ±۵/۵	۵۰/۳^{a} ±۴/۹	۱۲۷/۴^{b} ±۳/۷	۶۳/ ۴^{a} ±۹/۳	۷۹/۳^{a} ±۱/۶
شاهد	۸۳/ ۸^{a} ±۸/۷	۱۳۳/۶^{b} ±۲/۹	۵۳/۲^{a} ±۷/۳	۱۰۹/ ۰^{b} ±۶/۳	۷۵/۲^{a} ±۸/۲	۷۱/۴^{a} ±۱۲/۷

+ و * : به ترتیب میانگین و انحراف معیار می‌باشند.
حروف مشابه در هر ردیف مربوط به هر کدام از روش‌ها، نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵% بر اساس آزمون t جفت شده است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]



(ب) (الف)

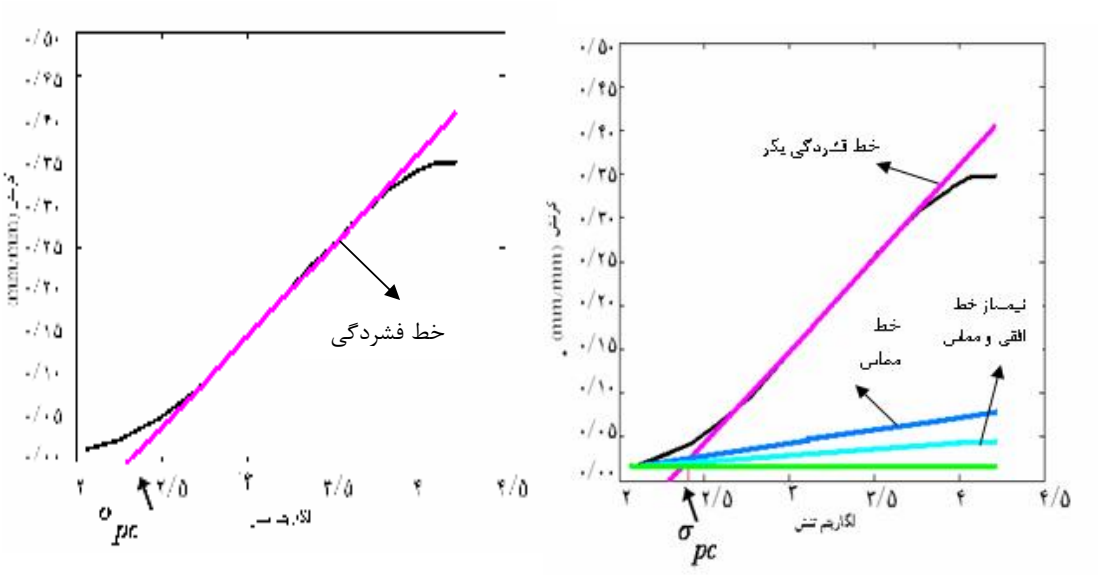


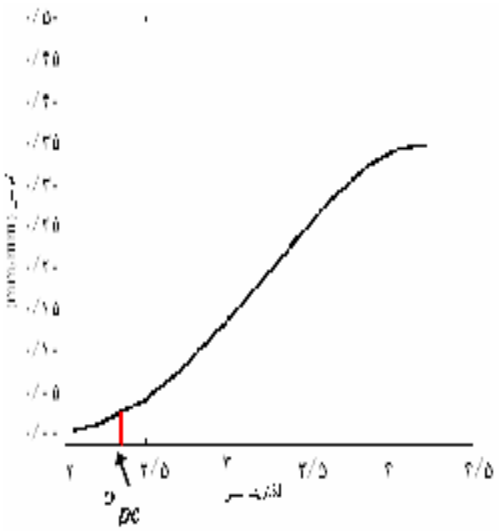
(ج)

شکل۴. روش‌های تعیین تنش پیش‌تراکمی از منحنی لگاریتم تنش - نشست آزمایش PST: الف) روش کاساگراند، ب) روش تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها و ج) روش نقطه بیشینه انحنا.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]





شکل۵. روش‌های تعیین تنش پیش‌تراکمی از منحنی لگاریتم تنش - کرنش آزمایش CCT: الف) روش کاساگراند، ب) روش تقاطع خط فشردگی بکر با محورxها و ج) روش نقطه بیشینه انحنا.

بارگذاری در حالت محصور، مقادیر تنش پیش‌تراکمی در آزمایش CCT و تخمین زده شده با روش کاساگراند، بیشتر از مقادیر آن در آزمایش PST بود. بنابراین، می‌توان گفت، نتایج حاصل از آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) مطمئن‌تر می‌باشد. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط طهماسبی (۱) هم‌آهنگی دارد. در روش نقطه بیشینه انحنا، در ۴ مورد (کمپوست ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار و کود شیمیایی و شاهد) مقادیر تنش پیش‌تراکمی به دست آمده با آزمایشCCT به‌طور معنی‌داری

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

بیشتر از PST بود. در صورتی که در روش تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها، مقادیر تنش پیش‌تراکمی به دست آمده در دو آزمایش PST و CCT تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند.

نتایج نشان داد که در تیمارهایی که کودی آلی داده نشده (تیمارهای شاهد و کود شیمیایی) و یا کمترین مقدار داده شده بود (۲۵ تن در هکتار) و از آزمایش PST برای تعیین تنش پیش‌تراکمی آنها استفاده شد، روش کاساگراند راه کار مناسبی محسوب می‌شود. میانگین تنش پیش‌تراکمی برای این تیمارها و برآورده شده با روش کاساگراند برای نمونه‌های تهیه شده در رطوبت وزنی ۱۷/۱ و ۲۰/۹ درصد، به ترتیب ۱۲۱/۲ و ۸۹ کیلوپاسکال بود که در مقابل پیش بار kPa ۱۰۰ وارده به خاک برآوردهای خوبی محسوب می شوند. در صورتی که برای تیمارهایی که مقادیر زیاد کود (۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار) به خاک داده شده بود، روش نقطه بیشینه انحنا روش مناسبی برای برآورد تنش پیش‌تراکمی محسوب می‌شود. میانگین برای این تیمارها کودی زیاد (۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار) و تهیه شده در رطوبت وزنی ۱۷/۱ و ۲۰/۹ درصد، به ترتیب ۱۲۷/۲ و ۹۸kPa که در مقابل پیش بار وارده به خاک (۱۰۰ kPa) برآوردهای قابل قبولی به حساب می‌آید می‌شود.

مقایسه روش‌های برآورد تنش پیش‌تراکمی از منحنی فشردگی خاک در آزمایش‌های PST و CCT

در رطوبت وزنی ۱۷/۱ درصد و با آزمایش PST، روش نقطه بیشینه انحناء کمترین مقادیر تنش پیش‌تراکمی را برآورد نمود و مقادیر برآورد شده با روش کاساگراند به طور معنی‌داری بیشتر از روش نقطه بیشینه انحناء بود (جدول ۵). در آزمایش CCT، در خصوص پنج تیمار کودی شامل ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ تن لجن فاضلاب در هکتار، ۱۰۰ تن کمپوست در هکتار و شاهد تفاوت معنی‌دار بین روش‌های محاسبه تنش پیش‌تراکمی وجود نداشت در حالی که در سایر تیمارها مقادیر برآورد شده با روش تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها به طور معنی‌داری کمتر از روش کاساگراند بود.

در رطوبت وزنی ۲۰/۹ درصد و با آزمایش PST، در هر سطح کودی به جز تیمار ۱۰۰ تن لجن فاضلاب در هکتار، روش نقطه بیشینه انحنا کمترین مقادیر تنش پیش‌تراکمی را برآورد نمود (جدول ۶). در همین سطح رطوبتی ولی در آزمایشCCT، تفاوت معنی دار بین روش‌های تعیین تنش پیش تراکمی در تیمارهای ۲۵ تن در هکتار لجن فاضلاب، کود گاوی و کمپوست و ۵۰ تن در هکتار کود گاوی دیده نشد و در سایر تیمار ها مقادیر برآورد شده با روش تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها به‌طور معنی‌داری کمتر از روش کاساگراند بود.

این نتایج با توجه به شکل منحنی‌های هر دو آزمایش فشردگی نیز قابل تفسیر است. با توجه به شکل منحنی لگاریتم تنش ـ نشست حاصل از آزمایش PST (شکل ۴) که متشکل از دو منطقه خطی متمایز است یعنی منطقه خط فشردگی مجدد در تنش‌های کمتر از تنش پیش‌تراکمی و خط فشردگی بکر خطی در تنش‌های زیاد، انتظار می‌رود که مقادیر تنش پیش‌تراکمی حاصل از روش کاساگراند و روش نقطه بیشینه انحنا به ترتیب در سمت راست و در سمت چپ مقدار تنش پیش‌تراکمی حاصل از روش تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها قرار گیرند. با توجه به S شکل بودن منحنی لگاریتم تنش - کرنش حاصل از آزمایش CCT (شکل ۵) که دارای دو بخش مجزای مقعر و محدبی است که توسط یک ناحیه خطی مجزا شده‌اند، طبیعی به‌نظر می‌رسد که مقادیر تنش پیش‌تراکمی ناشی از روش کاساگراند و روش تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها به‌ترتیب در سمت راست و چپ مقدار تنش پیش‌تراکمی ناشی از نقطه بیشینه انحنا قرار گیرد.

در آزمایش PST، رابطه بین مقادیر تنش پیش‌تراکمی برآورد شده با روش‌های انحنای بیشینه و تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها و روش کاساگراند به ترتیب در شکل ۶- الف و ب نیز نشان داده شده است. اگرچه رابطه خطی و معنی‌داری در دو حالت وجود دارد، ولی مقادیر برآورد شده با روش انحنای بیشینه حدودا" نصف مقادیر تخمین زده شده با روش کاساگراند است، در حالی که مقادیر برآورد شده با تقاطع خط

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

جدول۵. مقایسه مقادیر تنش پیش‌تراکمی (kPa) تعیین شده با سه روش در تمام تیمارهای کودی با رطوبت وزنی ۱۷/۱% در آزمایش‌های PST و CCT

تیمارکودی (تن در هکتار)	آزمایش: PST — روش تعیین تنش پیش‌تراکمی: کاساگراند	PST — نقطه بیشینه انحناء	PST — تقاطع خط فشردگی بکر با محور x ها	آزمایش: CCT — روش تعیین تنش پیش‌تراکمی: کاساگراند	CCT — نقطه بیشینه انحنا	CCT — تقاطع خط فشردگی بکر با محور x ها
لجن فاضلاب ۲۵	۱۶۰/۸$^{a+}$ ±۱۳/۷*	۱۰۰/۴^{c} ±۱۲/۱	۱۵۰/۲۹^{b} ±۱۴/۴	۱۶۵/ ۴^{a} ±۳۵/۴	۱۳۸/ ۸^{a} ±۳۴/۶۲	۱۳۴/۲^{a} ±۳۶/۳
لجن فاضلاب ۵۰	۱۷۸/۱^{a} ±۲/۴	۱۰۳ ^{c} ±۶/۸	۱۵۷/ ۲^{b} ±۱/۱	۳۶۸/۰ ^{a} ±۱۳۷	۲۲۴/۲ ^{a} ±۸۹/۵	۱۹۷/۷^{a} ±۵۶/۴
لجن فاضلاب ۱۰۰	۲۵۴/۷^{a} ±۱۵/۲	۱۸۹/۹ ^{b} ±۱۲/۷	۲۸۲/۴^{a} ±۳۹/۲	۳۱۱/۱ ^{a} ±۵۷/۹	۲۶۱/۹ ^{a} ±۵۵/۰۷	۲۵۹/ ۰^{a} ±۵۷/۶
کمپوست ۲۵	۱۱۳/۰^{a} ±۳/۱	۸۰/۰ ^{b} ±۳/۲	۱۰۳/۳^{a} ±۲/۹	۳۳۸/۲^{a} ±۴۵/۳	۲۰۹/ ۴^{b} ±۴۲/۴	۱۸۴/۷^{b} ±۱۰/۶
کمپوست ۵۰	۲۱۸/۵^{a} ±۸/۸	۹۰/۶ ^{b} ±۷/۴	۲۰۴/۷^{a} ±۳۳	۴۲۳/ ۶^{a} ±۱۸/۷	۳۵۴/۲ ^{a} ±۴۸/۶	۲۲۳/۹^{b} ±۲۷/۳
کمپوست۱۰۰	۲۳۵/۲ ^{a} ±۳۳/۸	۱۱۲/۳^{b} ±۶/۲	۲۰۶/۰ ^{a} ±۱۰/۲	۵۰۶/ ۵ ^{a} ±۹۴/۱	۴۴۲/۲ ^{a} ±۴۶/۲	۳۵۲/۹^{a} ±۳۹/۴
گاوی ۲۵	۱۵۴/۳^{a} ±۴/۹	۱۰۷/۲^{b} ±۳/۸	۱۴۰/۸^{a} ±۳/۷	۲۷۱/ ۱^{a} ±۲۵/۲	۱۸۵/۱^{b} ±۱۳/۲	۱۵۸/۹^{b} ±۲۰/۱
گاوی ۵۰	۲۳۹/۸^{a} ±۵/۹	۱۱۹/۸ ^{b} ±۱/۹	۲۱۹/۳^{a} ±۷/۹	۳۸۲/۰ ^{a} ±۵۲/۷	۲۴۵/۷^{b} ±۶/۵	۱۶۲/۴^{b} ±۲۸/۶
گاوی ۱۰۰	۲۶۰/۱^{a} ±۹/۹	۱۴۷/۰ ^{c} ±۱۶/۳	۲۲۰/۱^{b} ±۳/۷	۳۹۵/۴^{a} ±۴۱/۶	۳۰۳/۹^{a} ±۲۹/۸	۱۷۷/۲^{b} ±۹/۱
کودشیمیایی	۹۱/۹^{a} ±۴/۷	۶۴/۳^{c} ±۳/۵	۷۹/۷^{b} ±۱/۹	۱۶۵/۸^{a} ±۱۳/۲	۱۳۲/ ۸^{b} ±۳/۸	۹۶/۳^{c} ±۴/۹
شاهد	۸۵/۸^{a} ±۸/۰۱	۵۸/۵^{c} ±۱۰/۳۴	۷۶/۴^{b} ±۸/۲۵	۲۰۹/۴^{a} ±۶۸/۸	۱۴۸/۳^{a} ±۳۱/۶۹	۸۲/۷^{a} ±۳/۴

+ و *: به ترتیب میانگین و انحراف معیار می‌باشند.

حروف مشابه در هر ردیف مربوط به هر کدام از آزمایش‌ها نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵% بر اساس آزمون دانکن است.

جدول۶. مقایسه مقادیر تنش پیش‌تراکمی (kPa) تعیین شده با سه روش در تمام تیمارهای کودی با رطوبت وزنی ۲۰/۹% در آزمایش‌های PST و CCT

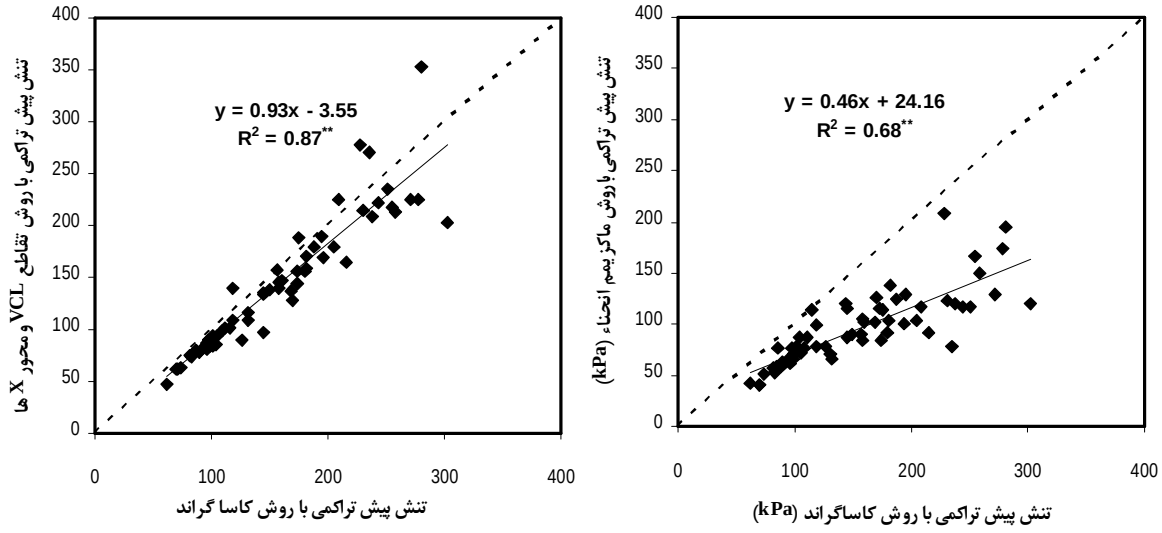
تیمار کودی (تن درهکتار)	آزمایش: PST — روش تعیین تنش پیش‌تراکمی: کاساگراند	PST — نقطه بیشینه انحنا	PST — تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها	آزمایش: CCT — روش تعیین تنش پیش‌تراکمی: کاساگراند	CCT — نقطه بیشینه انحناء	CCT — تقاطع خط فشردگی بکر با محورxها
لجن فاضلاب ۲۵	۹۹/۸$^{a+}$ ±۲/۸*	۶۸^{c} ±۲/۲	۹۰/۲ ^{b} ±۲/۱	۱۶۰/ ۳ ^{a} ± ۸/۷	۱۳۳/۰^{a} ±۲۱/۴	۱۰۹/۹^{a} ±۴۰/۶
لجن فاضلاب ۵۰	۱۲۴/۸^{a} ±۱۱/۷	۹۴/۸ ^{b} ±۱۳/۱	۹۰/۷ ^{b} ±۳/۲	۱۸۳/۵^{a} ±۴۱	۱۳۷/۲^{ab} ±۲۰/۹	۱۱۶/۹^{b} ±۱۹/۹
لجن فاضلاب ۱۰۰	۱۶۱/۷^{a} ±۵۵	۱۰۴/۵ ^{a} ±۱۷/۴	۱۳۶/۳ ^{a} ±۴۴/۳	۱۹۳/۲۷^{a} ±۴۴/۸	۱۴۵/۰^{b} ±۲۹	۹۱/۶^{c} ± ۳۷/۲
کمپوست ۲۵	۸۴/۰^{a} ±۱/۲	۶۲/۵ ^{b} ±۷	۷۷/۱ ^{ab} ±۱	۱۶۰/۳^{a} ±۸/۸	۱۳۷/۰^{a} ±۷۰/۲	۷۱/۹^{a} ±۲/۴
کمپوست ۵۰	۱۱۲/۲^{a} ±۱۷/۹	۷۲/۴ ^{b} ±۶/۲	۱۱۳/۲ ^{a} ±۱۹/۱	۱۸۹/۴^{a} ± ۱۱/۷	۱۷۷/۹^{b} ± ۱۱/۹	۱۰۲/۰^{c} ±۷/۱
کمپوست۱۰۰	۱۴۰/۰± ^{a}۱۵/۳	۹۷/۰ ^{b} ± ۱۷/۳	۱۲۷/۷ ^{ab} ±۶/۵	۴۴۸/۶^{a} ±۸۸/۶	۳۹۴/۱^{a} ±۸۳	۱۸۸/۶ ^{b} ±۳۵/۳
گاوی ۲۵	۹۸/۱^{a} ±۲/۱	۷۱/۳ ^{c} ±۳/۴	۸۹/۲ ^{a} ±۲/۸	۱۷۱/۴^{a} ±۵۹/۹	۱۶۵/ ۹^{a} ±۲۲/۹	۱۲۸/۰^{a} ±۳۱/۸
گاوی ۵۰	۱۶۶/۸^{a} ±۵/۱	۹۱/۹ ^{b} ±۵/۶	۱۴۶/۱ ^{a} ±۵/۷	۲۳۰/۴^{a} ± ۴۷/۸	۱۷۳/۰^{a} ±۱۶/۲	۱۳۹/۰^{a} ±۵۴/۱
گاوی ۱۰۰	۱۸۴/۲^{a} ±۶	۱۲۶/۹ ^{b} ±۷/۱	۱۷۶/۱ ^{a} ±۶/۲	۲۴۴/۲^{a} ±۳۶/۸	۱۸۷/۱^{b} ±۲۶/۱	۱۶۱/۰^{b} ±۴۲/۴
کودشیمیایی	۷۴/۱^{a} ±۷/۱	۵۰/۳ ^{b} ±۵	۶۳/۴ ^{a} ±۹/۳	۱۴۴/۸^{a} ±۵/۵	۱۲۷/۴^{b} ±۳/۷	۷۹/۳^{c} ±۱/۶
شاهد	۸۳/۸^{a} ±۸/۷	۵۳/۲ ^{c} ±۷/۳	۷۵/۲ ^{b} ±۸/۲	۱۳۳/۶^{a} ±۲/۹	۱۰۹/۰^{a} ±۶/۳	۷۱/۴^{b} ±۱۲/۷

+ و *: ترتیب میانگین و انحراف معیار می‌باشند.

حروف مشابه در هر ردیف مربوط به هر کدام از آزمایش‌ها نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵% بر اساس آزمون دانکن می‌باشد.

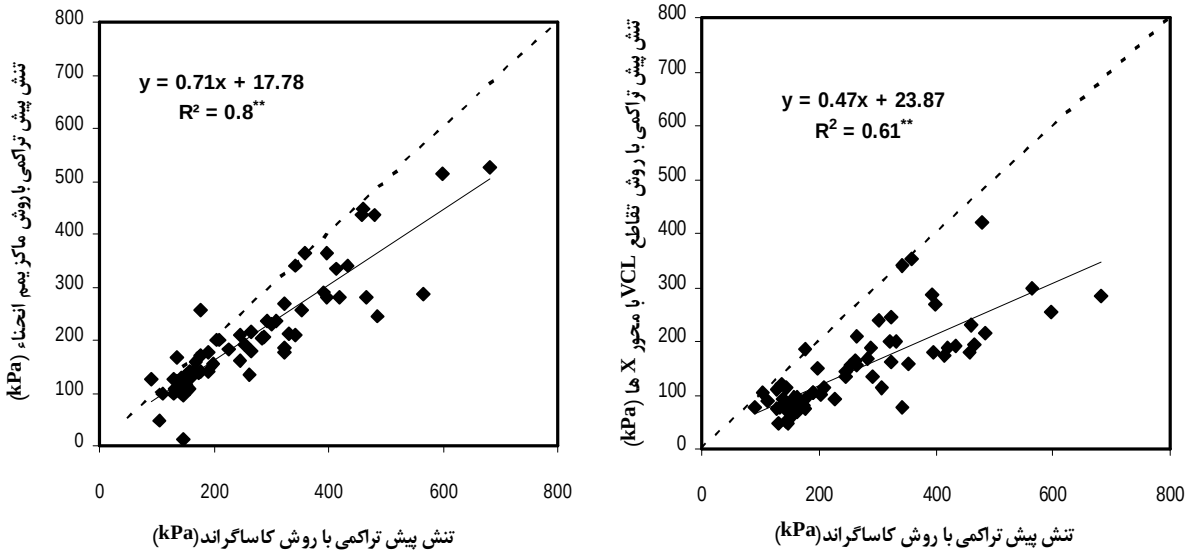
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]



(الف) (ب)

شکل ۶. مقایسه مقادیر تنش پیش‌تراکمی تعیین شده توسط روش‌های نقطه بیشینه انحناء و تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها با روش کاساگراند در آزمایش PST.



(الف) (ب)

شکل ۷. مقایسه مقادیر تنش پیش‌تراکمی تعیین شده با روش‌های نقطه بیشینه انحنا و تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها با روش کاساگراند در آزمایش CCT.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

فشردگی بکر با محور xها، تقریباً نزدیک مقادیر به دست آمده با روش کاساگراند است. در آزمایش CCT، رابطه مشابه‌ای بین مقادیر تنش پیش‌تراکمی بر آورد شده با روش انحنای بیشینه و روش کاساگراند وجود دارد (شکل ۷- الف)، در صورتی که مقادیر برآورد شده با روش تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها حدودا" ۳۰ درصد کم تخمینی نسبت به روش کاساگراند دارد (شکل ۷- ب).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، منحنی فشردگی خاک‌های تیمار شده با سطوح مختلف (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار) سه نوع کود (لجن فاضلاب، کمپوست و کود گاوی) و تهیه شده در دو سطح رطوبت وزنی (۱۷/۱ و ۲۰/۹ درصد) با دو نوع آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) و فشردگی محصور (CCT) تهیه شد و سپس با سه روش (کاساگراند، نقطه بیشینه انحنا و تقاطع خط فشردگی بکر با محور xها در کرنش صفر)، مقادیر تنش پیش‌تراکمی (σ_{pc}) خاک‌ها تعیین شدند. مقدار تنش پیش‌تراکمی برای هر تیمار کودی، علاوه بر شرایط رطوبت اولیه خاک، به نوع آزمایش و روش تعیین این تنش بستگی دارد. مقادیر σ_{pc} برآورد شده برای تیمارهایی که با کودها آلی تیمار شده بودند بیش تخمینی داشت و این بیش تخمینی در هر دو آزمایش با افزایش مقدار کودآلی افزایش یافت، ولی این بیش تخمینی در آزمایش CCT بیشتر از آزمایش PST بود. بنابراین، می‌توان بیان نمود که نتایج حاصل از آزمایش PST برای برآورد تنش پیش-تراکمی خاک مطمئن‌تر است. برای هر تیمار کودی، با افزایش رطوبت وزنی خاک از ۱۷/۱به ۲۰/۹ درصد، مقدار تنش پیش-تراکمی کاهش یافت. برای خاک‌های تیمار نشده با کودهای آلی (شاهد و تیمار کود شیمیایی) و یا تیمار شده با مقدار کم کودهای آلی (۲۵ تن در هکتار)، استفاده از آزمایش PST و به کارگیری روش کاساگراند برای تعیین تنش پیش‌تراکمی (تنش در آستانه تراکم) را می‌توان توصیه نمود. در صورتی که برای خاک‌های تیمار شده با مقادیر زیاد کودهای آلی (۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار)، روش کاساگراند بیش تخمینی داشته و استفاده از روش نقطه بیشینه انحنا را می‌توان پیشنهاد نمود.

سپاسگزاری

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

منابع مورد استفاده

۱. طهماسبی، م. ۱۳۸۴. تعیین رابطه بین تنش پیش‌تراکمی و مقاومت برشی خاک و طراحی اندازه‌گیر مقاومت برشی در مزرعه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲. ۲. وفاییان، م.، ۱۳۶۹. *آزمایش‌های مکانیک خاک (مستند به استاندارد BS 1377-1975)*. جلد دوم، نشر قومس- شفق، اصفهان.

3. Alexandrou, A., and R. Earl. 1995. In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. J. Agric. Eng. Res. 61: 67-72.
4. Arvidsson, J. and T. Keller. 2004. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. Soil Till. Res. 77: 85-95.
5. 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, 3: 60-64.
6. Cavalieri, K. M., V. J. Arvidsson, A. P. Silva and T. Keller. 2008. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. Soil Till. Res. 98: 17–26.
7. Dawidowski, J. B. and A. J. Koolen. 1994. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. Soil Till. Res. 31: 277-282.
8. Dias Junior, M. S. and F. J. Pierce. 1995. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil Technol. 8: 139-151.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]

9. 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.
10. Jose, B. T., A. Sridharan and B. M. Abraham. 1989. Log-log method for determination of preconsolidation pressure. Geotechn. Testing J. 12: 230-237.
11. Keller T., J. Arvidsson, J. B. Dawidowski and A. J. Koolen. 2004. Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling. Soil Till. Res. 77: 97–108.
12. Koolen A. J. 1974. A method for soil compactibility determination. J. Agric. Eng. Res.19: 271–278.
13. 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 2th Workshop, NATO ASI Series, Kluwer, Dordrecht.
14. Lebert, M. and R. Horn. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. Soil Till. Res. 19: 275-289.
15. Sälfors, G. 1975. Preconsolidation pressure of soft high plastic clays. PhD Thesis, Department of Geotechnical Engineering, Gothenburg, Germany.
16. Schmertmann, J. H. 1955. The undisturbed consolidation behavior of clay. Trans. ASCE, 120: 1201-1233.
17. Vossbrink, J. and R. Horn, 2004. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. Eur. J. Forest Res. 123: 259-267.
18. Youssff, A. and G. A. Ali. 1982. Determination of soil parameters using plate test. J. Terramech. 19: 129-147.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.55.13.1]